



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MIRO MÄNTYLÄ  
KRIITTISEN LAITOKSEN SÄHKÖNJAKELUJÄRJESTELMÄN  
SUOJAUKSEN SELEKTIIVISYYS

Diplomityö

Tarkastaja: professori Pekka Verho  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-  
neuvoston kokouksessa 28. maaliskuu-  
ta 2018

## TIIVISTELMÄ

**MIRO MÄNTYLÄ:** Kriittisen laitoksen sähköjakelujärjestelmän suojauksen selektiivisyys

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 63 sivua

Marraskuu 2018

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Sähköverkot ja -markkinat

Tarkastaja: professori Pekka Verho

**Avainsanat:** selektiivisyys, suojaus, asettelut, lukitukset, oikosulkusuojaus

Nykyisten sähköjakelujärjestelmien yhä kasvaessa ja samalla monimutkaistuessa, tarvitaan entistä tarkempaa sähköjakelun selektiivisesti toimivan suojausjärjestelmän mallinusta ja määrittelemistä. Tämän diplomityön tarkoituksena oli määrittää, miten erään kriittisen laitoksen sähköjakelujärjestelmän suojaukset saadaan toimimaan selektiivisesti yhtenä kokonaisuutena, mahdollistaen näin laitoksen oikeanlaisen toiminnan erilaisissa käyttötilanteissa ja turvaten siellä olevien ihmisten terveyden jokaisena hetkenä.

Jotta suojaukset saadaan toimimaan selektiivisesti koko järjestelmässä, täytyy kiinnittää erityistä huomiota käytetyn sähköjakelujärjestelmän rakenteeseen sekä siinä käytettyihin suojalaitteisiin ja näiden eri yhdistelmiin. Lisäksi tulee määrittää oikeanlaiset suojausreleiden asetteluarvot, joilla suojaukset saadaan toimimaan selektiivisesti kaikissa eri käyttötilanteissa ilmenevissä vikatapauksissa. Kun sähköjakelujärjestelmä on saatu toimintaan, tulee riittävin kunnossapitotoimenpitein varmistaa suojausjärjestelmän selektiivinen toiminta myös jatkossa. Tämä vaatii saatavilla olevien käytönseurantatietojen hyödyntämistä ja tarkkailua.

Diplomityössä tarkasteltiin selektiivisyyden toteutumista aina kriittisen laitoksen keski-jänniteliitännästä pienjänniteverkon sähkökeskuksille asti. Tarkastelussa huomioitiin myös mahdollisten poikkeustilanteiden ja varasyöttöyhteyksien vaikutus selektiivisyyteen. Apuna selektiivisyydeltä tarkastelussa ja -määrittelyissä käytettiin ABB e-Design- ja Siemens Simaris-laskentaohjelmistoja. Näiden avulla pystyttiin koostamaan laajasta sähköjakelujärjestelmä selkeä mallinnus, jonka avulla pystyttiin määrittelemään suojauksesta selektiivisesti toimiva yhtenäinen kokonaisuus.

Työn avulla on pystytty havainnollistamaan oikeanlaisen suunnittelun ja toteutuksen merkitys toimivan suojausjärjestelmän rakentamisessa. Hyvällä suunnittelulla on pystytty turvaamaan järjestelmän mukautuminen myös tulevaisuudessa muuttuvien käyttötilanteiden luomiin haasteisiin, lisäksi uusia tekniikoita hyödyntämällä on saavutettu monipuolinen ja tulevaisuudessakin huollettavissa oleva sähköjakelujärjestelmän selektiivisesti toimiva suojaus.

## ABSTRACT

**MIRO MÄNTYLÄ:** Selectivity of electrical power distribution system protection in the critical facility

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 63 pages

November 2018

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Power Systems and Market

Examiner: Professor Pekka Verho

**Keywords:** selectivity, protection, parameter settings, interlocking, short circuit protection

As the electrical power distribution systems are constantly expanding and getting more complex, a more precise modeling and definition of selectively functioning power distribution system protection is needed. The purpose of this thesis was to define how protection of whole electrical power distribution system in the critical facility can be made selectively functioning, thus enabling correct functioning of the facility in different operating conditions and always securing the safety of people inside.

To get the protection functioning selectively in the whole system, attention must be paid for the structure of electrical power distribution system and for protective devices and different combinations of these. In addition, correct settings of protective device parameters must be done to get the whole system functioning selectively in all fault situations of different operating conditions. When electrical power distribution system is operational, the selective functioning of distribution system protection in the future must be ensured by sufficient maintenance procedures. This requires monitoring and exploiting the data available of the power distribution system data acquisition.

The functioning of protection system selectivity was reviewed all the way from the critical facility medium voltage connections to individual low voltage switchboards. The effect of possible exceptional situations and power reserve supplies was also considered in the reviewing. ABB e-Design and Siemens Simaris engineering software was utilized in reviewing selectivity and defining parameter settings. By using these software, it was possible to create a simple model of the large power distribution system and define selective functioning of the whole protection system.

With this thesis, it was possible to demonstrate the relevance of proper designing and execution in building a correctly functioning protection system. By using good design solutions, it has been possible to ensure the protection system to function also in different changing operating conditions in the future. Exploiting new technology has enabled to achieve a versatile and serviceable selectively functioning power distribution system protection.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Ramboll Finland Oy:lle vuoden 2018 aikana. Työn ohjaajana toimi projektipäällikkö Arto Ahorinta, jota haluan kiittää asiantuntevasta ohjauksesta ja neuvoista työn aikana. Haluan kiittää myös suunnittelupäällikkö Jyrki Lahtista ja yksikönpäällikkö Hannu Virkkusta mahdollisuudesta tehdä tämä diplomityö.

Työn tarkastajana toimi Tampereen teknillisen yliopiston professori Pekka Verho, jota haluan kiittää työn tarkastamisesta ja parannusehdotuksista.

Erityisesti haluan kiittää perhettäni, joka on tukenut minua koko opintojeni ajan.

Tampereella, 20.11.2018

Miro Mäntylä

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	KRIITTINEN LAITOS .....	2
2.1	Sähkön pääjakelujärjestelmä .....	2
3.	OIKOSULKUVIRRAT .....	4
3.1	Oikosulkuvirtojen tyypit .....	4
3.2	Laskenta .....	7
3.3	Tulkinta .....	9
4.	SELEKTIIVISYYS .....	11
4.1	Suojaustyytit .....	12
4.2	Sulakkeellinen suojaus .....	13
4.3	Relesuojaus .....	17
4.3.1	Aika- ja virtaselektiivinen suojaus .....	17
4.3.2	Asetteluarvojen määrittäminen .....	21
4.3.3	Lukitussuojaus .....	24
4.3.4	Muut suojaustavat .....	26
4.4	GOOSE-viestit .....	27
5.	KESKIJÄNNITEVERKON SUOJAUKSET .....	30
5.1	Keskijännitekojeistojen pääkatkaisijat .....	31
5.2	Keskijännitekojeistojen muuntajakatkaisijat .....	33
5.3	Maasulkusuojausten asettelu .....	34
6.	PIENJÄNNITEVERKON SUOJAUKSET .....	36
6.1	Pääkeskuksien pääkatkaisijat .....	36
6.2	Pääkeskuksien huoltosyötöt .....	40
6.3	Varavoiman tehosityöttöosa .....	41
6.4	Jakelukiskojen ja ryhmäkeskuksien syötöt .....	46
6.4.1	UPS-nousukeskuksien selektiivisyys .....	47
6.4.2	Jakelukiskojen selektiivisyys .....	51
7.	KOESTUKSET JA KÄYTÖNSEURANTA .....	55
7.1	Koestukset laitteiston valmistuttua .....	55
7.2	Käytönsuranta jatkossa .....	56
8.	YHTEENVETO .....	59
	LÄHTEET .....	61

## KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b>	<i>Sähköjakelujärjestelmä.....</i>	<b>3</b>
<b>Kuva 2.</b>	<i>Oikosulkuvirran käyttäytyminen.....</i>	<b>5</b>
<b>Kuva 3.</b>	<i>Sysäyskertoimen riippuvuus oikosulkuvirtapiirin R/X-suhteesta. ....</i>	<b>5</b>
<b>Kuva 4.</b>	<i>Tasavirtakomponentin vaikutusta kuvaava kerroin m.....</i>	<b>6</b>
<b>Kuva 5.</b>	<i>Vaihtovirtakomponentin vaikutusta kuvaava kerroin n.....</i>	<b>7</b>
<b>Kuva 6.</b>	<i>ABB e-Design ohjelmistolla toteutettu sähköverkon mallinnus. ....</i>	<b>8</b>
<b>Kuva 7.</b>	<i>500V OFAF-sulakkeiden toiminta-ajat. ....</i>	<b>14</b>
<b>Kuva 8.</b>	<i>500V OFAF sulakkeiden selektiivisyys.....</i>	<b>15</b>
<b>Kuva 9.</b>	<i>500V OFAF sulakkeiden virranrajoitus. ....</i>	<b>16</b>
<b>Kuva 10.</b>	<i>Vakioaikaisen ja käänteisaikaisen asettelun ero.....</i>	<b>18</b>
<b>Kuva 11.</b>	<i>Normal inverse- ja very inverse -käyrästöt .....</i>	<b>19</b>
<b>Kuva 12.</b>	<i>Siemens selektiivisyystaulukko. ....</i>	<b>22</b>
<b>Kuva 13.</b>	<i>Suojalaitteiden selektiivisyyskäyrästöt .....</i>	<b>23</b>
<b>Kuva 14.</b>	<i>Lukitusuojauksen toiminta eri tilanteissa .....</i>	<b>25</b>
<b>Kuva 15.</b>	<i>GOOSE-järjestelmän toteutusperiaate.....</i>	<b>28</b>
<b>Kuva 16.</b>	<i>Keskijännitekojeiston suojalaitteiden selektiivisyyskäyrästöt .....</i>	<b>31</b>
<b>Kuva 17.</b>	<i>Pääkatkaisijoiden asetteluarvot .....</i>	<b>38</b>
<b>Kuva 18.</b>	<i>Erään huoltosyötön asetteluarvot.....</i>	<b>41</b>
<b>Kuva 19.</b>	<i>Varavoiman sähköjakelu .....</i>	<b>42</b>
<b>Kuva 20.</b>	<i>Generaattorin tuottama oikosulkuvirta .....</i>	<b>43</b>
<b>Kuva 21.</b>	<i>Varavoiman tehosityöttöosan asetteluarvot .....</i>	<b>44</b>
<b>Kuva 22.</b>	<i>UPS-nousukeskuksen asetteluarvot.....</i>	<b>47</b>
<b>Kuva 23.</b>	<i>UPS-katkaisijoiden selektiivisyyskäyrästöt normaalisyötöllä.....</i>	<b>48</b>
<b>Kuva 24.</b>	<i>UPS-katkaisijoiden selektiivisyyskäyrästöt ohitusyötöllä.....</i>	<b>50</b>
<b>Kuva 25.</b>	<i>Jakelukiskon asetteluarvot.....</i>	<b>51</b>
<b>Kuva 26.</b>	<i>ABB 630 A katkaisija ja Siemens 200 A gG virranotin.....</i>	<b>53</b>

**TAULUKKOLUETTELO**

<b><i>Taulukko 1.</i></b>	<b><i>Jännitekerroin <math>c</math>.</i></b>	<b><i>4</i></b>
<b><i>Taulukko 2.</i></b>	<b><i>Sulakkeiden rajoitetut dynaamisen oikosulkuvirran arvot</i></b>	<b><i>10</i></b>
<b><i>Taulukko 3.</i></b>	<b><i>Toimintakäyräkohtaiset vakiot</i></b>	<b><i>20</i></b>
<b><i>Taulukko 4.</i></b>	<b><i>Sähköasemien suojareleiden asetteluarvot</i></b>	<b><i>30</i></b>
<b><i>Taulukko 5.</i></b>	<b><i>Pääkatkaisijoiden asetteluarvot</i></b>	<b><i>32</i></b>
<b><i>Taulukko 6.</i></b>	<b><i>Muuntajakatkaisijoiden asetteluarvot</i></b>	<b><i>33</i></b>
<b><i>Taulukko 7.</i></b>	<b><i>Maasulkusuojauksen asetteluarvot</i></b>	<b><i>34</i></b>
<b><i>Taulukko 8.</i></b>	<b><i>Lukitusuojauksen suuntauksien konfiguroinnit</i></b>	<b><i>45</i></b>

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

GOOSE	Generic Object Oriented Substation Event. IEC 61850 -standardissa määritelty pikaviesti reaaliaikakriittisen tiedon siirtoon.
IEC	International Electrotechnical Commission, kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition, käyttöhallintajärjestelmä
SFS	Finnish Standards Association, Suomen standardisoimisliitto
UPS	Uninterruptible Power Supply, keskeytymätön tehonsyöttö

$\alpha$	Toimintakäyräkohtainen vakio
$\beta$	Toimintakäyräkohtainen vakio
$c$	Jännitekerroin
$\Delta t_{IDMT}$	Käänteisaikaisen suojauksen porrasaika
$\Delta t_{DT}$	Vakioaikaisen suojauksen porrasaika
$E_1$	Toiminta-aikavirhe lähempänä vikapaikkaa olevassa releessä
$E_2$	Toiminta-aikavirhe suojausketjussa seuraavana olevassa releessä
$I >$	Ylikuormitussuojaus
$I >>$	Oikosulkusuojaus
$I >>>$	Hetkellinen oikosulkusuojaus
$I I >>>$	Hetkellinen oikosulkusuojaus, virta-arvo
$I$	Virta
$I_2$	Suojalaitteen toiminta-ajan mukainen vaadittu virta
$I^2 t$	Sulakkeen kokonaisenergia
$I_B$	Kuormitusvirta
$i_C$	Sulakkeen rajoittaman oikosulkuvirran huippuarvo
$I_k$	Oikosulkuvirta, pysyvä arvo
$I_k''$	Oikosulkuvirta, alkuarvo
$I_N$	Nimellisvirta
$I_o >$	Maasulkusuojaus, virta-arvo
$I_p$	Dynaaminen oikosulkuvirta
$I_p, raj$	Rajoitettu dynaaminen oikosulkuvirta
$i_S$	Oikosulkuvirran huippuarvo
$I_{th}$	Terminen oikosulkuvirta
$I_Z$	Jatkuvan kuormituksen virrankesto
$k$	Aseteltava aikakerroin
$K$	Sysäyskerroin
$L I >$	Ylikuormitussuojaus, virta-arvo
$m$	Vaimenevan tasavirtakomponentin vaikutus
$n$	Vaimenevan vaihtovirtakomponentin vaikutus
$R$	Resistanssi
$R_k$	Vikaresistanssi
$S I >>$	Oikosulkusuojaus, virta-arvo
$S_n$	Nimellinen näennäisteho
$t$	Aika
$t_1$	Ylikuormitussuojaus, aika-arvo
$t_2$	Oikosulkusuojaus, aika-arvo
$t_{CB}$	Katkaisijan toiminta-aika
$t_k$	Oikosulun kesto aika



$t_{LUKITUS}$	Lukitusuojauksen aika-arvo
$t_M$	Varmuusmarginaali
$t_R$	Retardatio eli pyörtöaika
$t_S$	Sulakkeen toiminta-aika
$U$	Jännite
$U_n$	Nimellisjännite
$U_o >$	Maasulkusuojaus, jännitearvo
$X$	Reaktanssi
$X_k$	Vikareaktanssi
$Z_k$	Vikaimpedanssi

# 1. JOHDANTO

Nykyisin yhä enemmän monimutkaistuvissa ja laajuudeltaan suurenevissa sähköjakelujärjestelmissä on tärkeää, että suojausjärjestelmä toimii selektiivisesti. Mitä kriittisempi osa sähköjakelujärjestelmä on koko laitoksen toiminnoissa, sitä tärkeämpään rooliin hyvin suunniteltu sähköjakelujärjestelmän suojauksen selektiivisyys nousee. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi sairaalat ja ydinvoimalat. Näissä laitoksissa suojauksen selektiivisyydellä varmistetaan, että mahdollisen vian sattuessa vikapaikan laajuus pysyy minimoituna ja vikaa edeltäneeseen normaaliin tilanteeseen päästään palaamaan takaisin mahdollisimman pian.

Tämän diplomityön tarkoituksena on selvittää millä suojalaitteilla ja niiden yhdistelmillä sekä suojaroleisiin määriteltävillä asetteluarvoilla saavutetaan monipuolinen ja selektiivisesti toimiva sähköjakelujärjestelmän suojaus. Sähköjakeluverkkoa tutkitaan kokonaisuudessaan niin normaalissa käyttötilanteessa kuin varasyöttötilanteessakin, lisäksi otetaan huomioon mahdollisten huolto- ja UPS-syöttöjen aiheuttamat haasteet. Kohteena olleen erään kriittisen laitoksen sähköjakelujärjestelmä koostuu keskijännitekojeistoista sähköasemaliityntöineen, pienjänniteverkon sähköjakelusta aina jakelumuuntajilta pistoriakeskuksille asti sekä järjestelmään liitetyistä varavoimakoneista.

Selektiivisyyttä arvioitaessa ja tarvittavien arvojen määrittelyissä käytetään apuna ABB e-Design ja Siemens SIMARIS-ohjelmistoja, valmistajien omia selektiivisyydestaulukoita ja erillisiä suojalaitteille teetettyjen laboratoriotestien tuloksia. Näillä ohjelmistoilla pystytään mallintamaan sähköjakelujärjestelmän toimintaa erilaisissa käyttötilanteissa ja tarkistamaan suojauksien selektiivinen toiminta koko järjestelmässä kaikissa käyttötilanteissa. Työssä tutkitaan myös minkälaisia haasteita ja ongelmia kahden eri laitevalmistajan suojalaitteiden käyttäminen samassa suojausjärjestelmässä aiheuttaa.

Työn alussa on kerrottu tarkemmin kohteena olleen projektin sähköjakelujärjestelmän rakenteesta ja toiminnoista. Luvuissa 3 ja 4 on käyty läpi perusteoriaa oikosulkulaskennan ja suojauksien selektiivisyyden taustalla. Tämän jälkeen luvuissa 5 ja 6 on esitetty mitä ratkaisuja on päädytty käyttämään keskijännite- ja pienjänniteverkon suojauksissa. Näistä pienjänniteverkon suojaukset muodostivat suuremman osan työmäärästä, keskijänniteverkon suojauksien vaikuttaessa kuitenkin merkittävästi pienjänniteverkon mahdollisiin ratkaisuvaihtoehtoihin. Lopuksi luvuissa 7 ja 8 on käyty läpi sähköjakelujärjestelmän suojauksen käytönseurantaa jatkossa ja työstä saatuja tuloksia sekä projektin aikana ilmenneitä haasteita.

## 2. KRIITTINEN LAITOS

Työn kohteena olleen erään kriittisen laitoksen sähköjakelujärjestelmä on hyvin laaja monine pääkeskuksineen ja huoltosyöttöineen sekä varavoimayhteyksineen. Laitoksen toiminta liittyy hyvin läheisesti ihmisten terveyteen, joten vikatilanteiden tulee olla mahdollisimman hyvin hallussa ja vika-alueet rajattuna mahdollisimman pieniksi. Lisäksi tulee varmistaa varavoimajärjestelmien sujuva toiminta ja suojaus niissä mahdollisesti esiintyviä vikoja varten.

Nykyinen laitos on valmistunut ja otettu käyttöön jo 50-luvulla ja sitä on laajennettu tarpeiden niin vaatiessa aina tähän päivään saakka. Tämä on kuitenkin johtanut jokseenkin toimimattomaan kokonaisuuteen laitokselle välttämättömien toimintojen kannalta. Tekniikan ja prosessien kehittymisen takia järkevimmäksi vaihtoehdoksi on tullut rakentaa täysin uusi laitos nykyisen laitoksen läheisyyteen, jolloin saavutetaan tehokkaasti toimiva ja tulevaisuuden tarpeet huomioon ottava kokonaisuus. Laitos on kooltaan n. 100 000 m<sup>2</sup> käsittävä uudisrakennushanke, joka tullaan toteuttamaan sähköjakelujärjestelmän osalta useassa eri vaiheessa.

### 2.1 Sähkön pääjakelujärjestelmä

Selektiivisyyden kannalta suurimmat haasteet asettaa sähköjakelujärjestelmän suuri koko lukuisine vara-/huoltosyöttöyhteyksineen sekä useassa portaassa etenevät jakeluhaarat. Lisäksi järjestelmän komponentit ovat kahden eri valmistajan toimittamia, keskijännitekojeistot ja pääkeskuksilta lähtevät jakelukiskot sekä laitteistot siitä eteenpäin ovat pääosin Siemensin toimittamia. Kun taas 400V pääkeskukset laitteistoineen ja käytönvalvontajärjestelmä SCADA ovat ABB:n toimittamia.

Sähköjakelujärjestelmän keskijänniteverkko koostuu viidestä eri keskijännitekojeistosta, joista kolme on varsinaisia pääkojeistoja. Nämä kolme keskijännitekojeistoa ovat toisiinsa yhteydessä rengassyöttöjen välityksellä. Jokaiseen kojeistoon tulee oma liityntä eri sähköasemalta, joista jokainen liityntä pystyy syöttämään kerralla koko laitoksen tarvitseman tehon. Normaalisissa tilanteissa vain yksi liityntä on käytössä ja kaksi muuta kojeistoa ovat liitettynä liitynnän syöttämään keskijännitekojeistoon. Tällöin kahden muun kojeiston välinen rengassyöttö ei ole käytössä, jolloin keskijänniteverkko on rakenteeltaan tähtimäinen, kuten nähdään kuvasta 1.

Jokaisesta pääkojeistosta syötetään yhtä keskijännitekojeistoa ja 400V pääkeskuksille tehoa syöttäviä 20/0,4 kV kuivamuuntajia. Pääkeskusten perässä on varsinaiset laitekeskukset, jakokeskukset ja ryhmäkeskukset sekä jakelukiskot. Jakelukiskojen avulla hoidetaan sähköjakelu laitoksen ylempiin kerroksiin, pääkeskusten sijaitessa paria 4. kerroksen keskusta lukuun ottamatta -1 kerroksessa, kaiken kaikkiaan laitoksessa on 7 kerrosta.



### 3. OIKOSULKUVIRRAT

Oikosulkuvirrat ovat yksi keskeisimmistä tiedoista, jotka tarvitaan selektiivistä sähkönjakelujärjestelmää suunniteltaessa ja määriteltäessä. Verkossa esiintyvien oikosulkuvirtojen arvot vaikuttavat suoraan valittujen komponenttien tyyppeihin ja siten myös selektiivisyyteen. Lisäksi suojalaitteiden asetteluita tehdessä tulee huomioida esiintyvien oikosulkuvirtojen suuruudet, jotta suojalaitteet toimivat vikatapauksissa selektiivisesti ja jotta katkaisijat havaitsevat aina myös minimioikosulkuvirran suuruisen virran aiheuttavat viat.

Oikosulkuvirran laskenta tapahtuu Theveninin menetelmällä, jossa yksivaiheisessa sijaiskytkennässä komponentit ja lähteet on korvattu oikosulkuimpedansseilla ja vikapaikkaan sijoitetulla ekvivalenttisella jännitelähteellä. Ekvivalenttinen jännitelähde koostuu vikapaikan käyttöjännitteestä  $U_n$  ja taulukon 1 mukaisesti jännitekertoimesta  $c$ , jolla määritetään lasketaanko minimi- vai maksimioikosulkuvirtaa. [9; 14]

**Taulukko 1.** Jännitekerroin  $c$ . [9]

Nimellisjännite $U_n$	Maksimioikosulkuvirta $c_{max}$	Minimioikosulkuvirta $c_{min}$
Pienjännite 100V-1000V		
a) 230V-400V	1.00	0.95
b) muut jännitteet	1.05	1.00
Keskijännite 1kV - 35kV	1.10	1.00

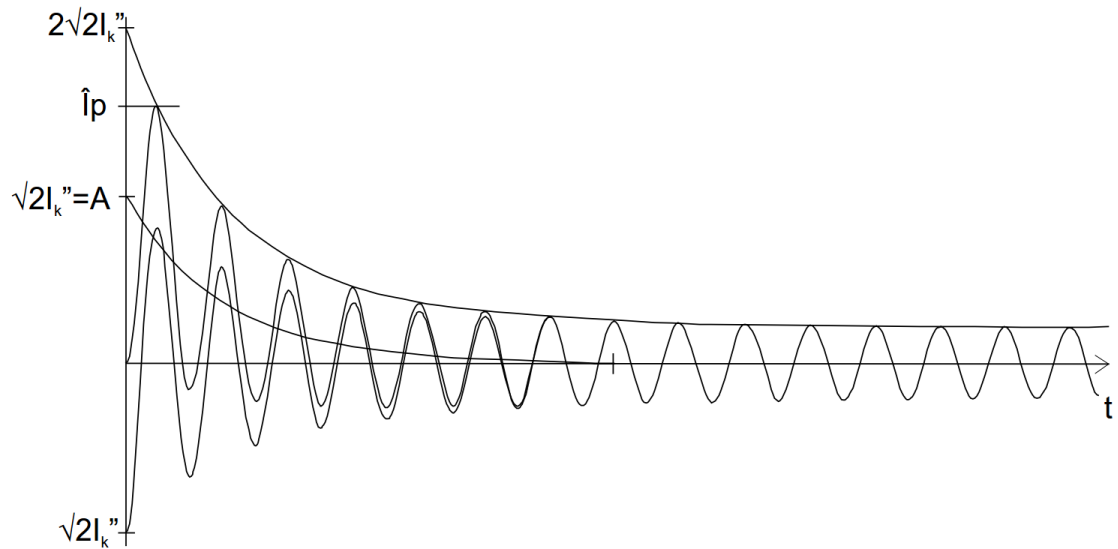
Oikosulkuvirta saadaan laskettua kaavalla

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k}, \quad (1)$$

jossa  $c$  on taulukon 1 mukainen jännitekerroin,  $U_n$  on syöttävän verkon jännite ja  $Z_k$  on impedanssi verkon vikapaikasta katsottuna. [9; 14]

#### 3.1 Oikosulkuvirtojen tyypit

Järjestelmän ja laitteistojen mitoitus tehdessä tulee tietää kolme eri oikosulkuvirran arvoa, joita ovat prospektiivinen  $I_k$ , terminen  $I_{th}$  ja dynaaminen oikosulkuvirta  $I_p$ . Terminen ja dynaaminen oikosulkuvirta saadaan määriteltä, kun tiedetään prospektiivinen oikosulkuvirta. Kuvassa 2 on nähtävissä oikosulkuvirran käyttäytyminen alkuhetkestä eteenpäin.

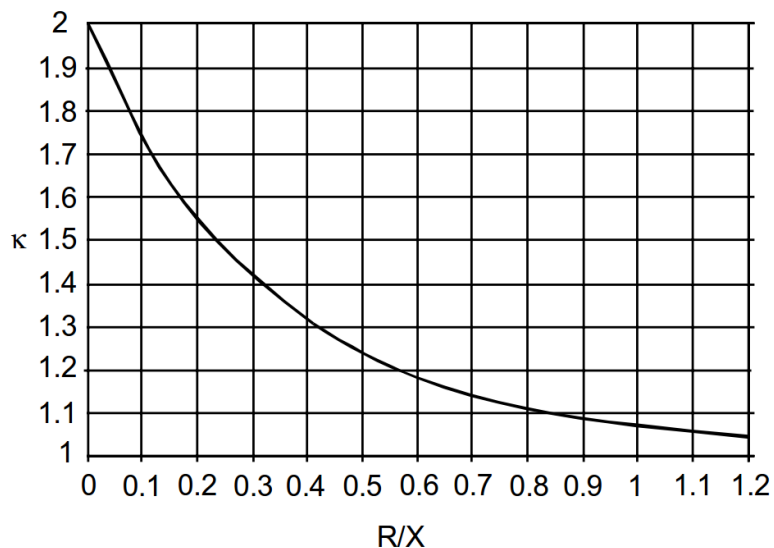


**Kuva 2.** Oikosulkuvirran käyttäytyminen. [9]

Kuten kuvasta nähdään, oikosulkuvirta  $I_k$  laskee nopeasti heti oikosulun tapahtuttua ja alkaa sitten tasoittua. Heti oikosulun alussa esiintyvä suurin mahdollinen oikosulkuvirran hetkellisarvo kuvaa dynaamista oikosulkuvirtaa  $I_p$  eli sysäys-oikosulkuvirtaa. Dynaaminen oikosulkuvirta saadaan laskettua kaavalla

$$I_p = K \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'', \quad (2)$$

jossa kerroin  $K$  = tarkasteltavan verkon sysäyskerroin. Tämä kerroin saadaan alla olevasta kuvasta 3, joka kuvaa sysäyskerroimen riippuvuutta oikosulkuvirtapiirin  $R/X$ -suhteesta. [1]



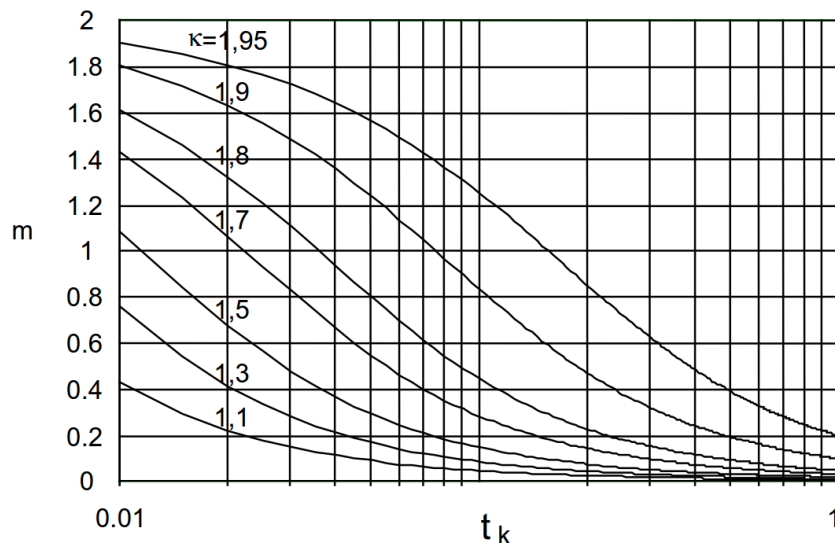
**Kuva 3.** Sysäyskerroimen riippuvuus oikosulkuvirtapiirin  $R/X$ -suhteesta. [9]

Prospektiivisen oikosulkuvirran määritelmästä esiintyy erilaisia näkemyksiä hieman lähteestä ja asiayhteydestä riippuen. Kolmivaihejärjestelmien oikosulkulaskentaa käsittelevässä standardissa IEC 60909-0 kohdassa 1.3.3 on määritelty, että prospektiivinen oikosulkuvirta on virta, joka kulkisi tilanteessa, jossa oikosulkuvirtapiirin vikaimpedanssi olisi korvattu mitättömän pienellä vikaimpedanssilla syöttöjärjestelmää muuttamatta. SFS 6000 Pienjännitesähköasennukset -standardissa taas prospektiivinen oikosulkuvirta määritetään tilanteessa, jossa oikosulkuvirtapiirin vikaimpedanssi on sähkönjakeluverkon kunkin kytkentätilanteen mukainen. ABB:n e-Design verkostolaskentaohjelmisto käyttää standardia IEC 60909, mutta prospektiivisen oikosulkuvirran laskennassa otetaan kuitenkin huomioon syöttävän verkon todellinen vikaimpedanssi. [1; 13; 16]

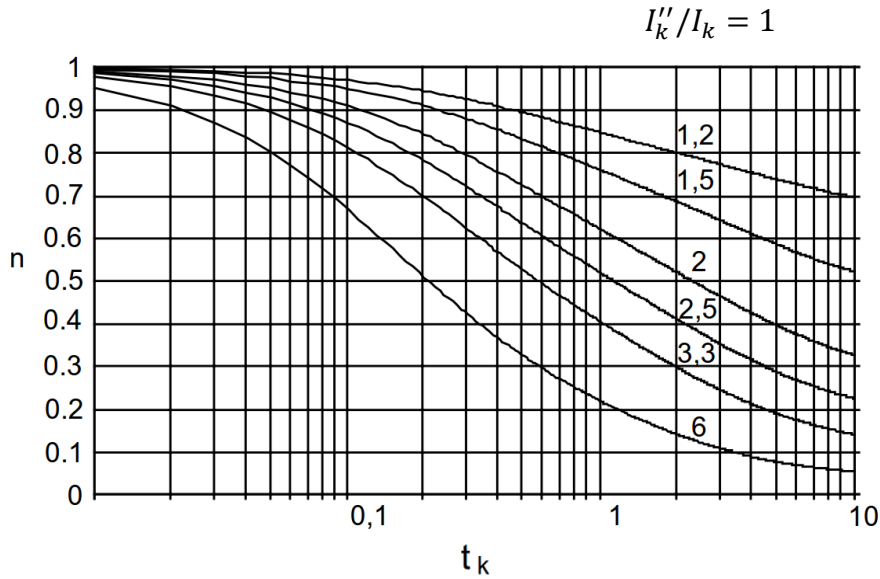
Myös terminen oikosulkuvirta saadaan määriteltyä, kun tiedetään prospektiivinen oikosulkuvirta, laskenta tapahtuu kaavalla

$$I_{th} = \sqrt{m + n} \cdot I_k'', \quad (3)$$

jossa kerroin  $m$  kuvaa vaimenevan tasavirtakomponentin vaikutusta ja kerroin  $n$  kuvaa vaimenevan vaihtovirtakomponentin vaikutusta. Nämä kertoimet määritellään alla olevien kuvaajien 4 ja 5 avulla.



**Kuva 4.** Tasavirtakomponentin vaikutusta kuvaava kerroin  $m$ . [9]



**Kuva 5.** Vaihtovirtakomponentin vaikutusta kuvaava kerroin  $n$ . [9]

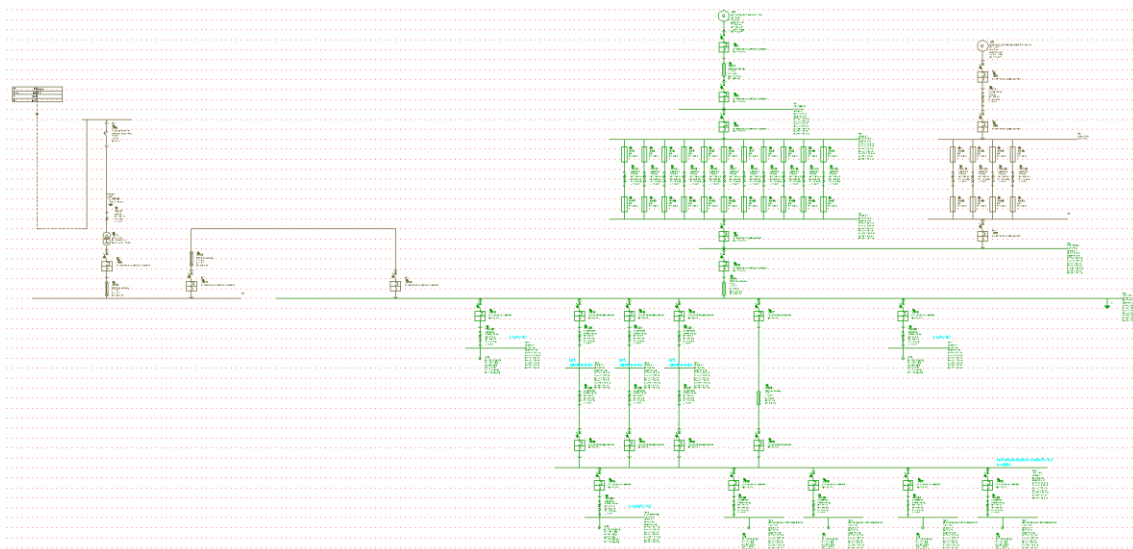
Kuvassa 4 on nähtävissä tasavirtakomponentin vaikutusta kuvaavan kertoimen  $m$  riippuvuus oikosulkuvirran sysäyskertoimella  $K$  suhteessa oikosulun kestoaikaan  $t_k$ . Kun taas kuvassa 5 on nähtävissä vaihtovirtakomponentin vaikutusta kuvaavan kertoimen  $n$  riippuvuus oikosulkuvirran alkuarvon ja pysyvän arvon suhteesta oikosulun kestoajan  $t_k$  suhteen. Sähköjakeluverkossa voidaan monesti käyttää oletttamaa, että  $\sqrt{m + n} = 1$ , jolloin terminen oikosulkuvirta on käytännössä sama kuin laskettu oikosulkuvirta. [9]

### 3.2 Laskenta

Koska laskettavana oleva sähköjakelujärjestelmä on hyvin laaja ja se sisältää useita erilaisia käyttötilanteita, oikosulkuvirtojen laskenta, ja muukin verkon mallinnus, tehtiin käyttäen ABB e-Design sähköjakeluverkon suunnitteluohjelmistoa. Ohjelmistoa käyttämällä pystyttiin minimoimaan mahdollisten laskentavirheiden määrä ja vähentämään laskentaan kuluvaa aikaa.

ABB e-Design ohjelmistolla voidaan mallintaa hyvin laajoja sähköverkkoja kokonaisuudessaan selkeässä kaaviomuodossa, kuten nähdään kuvasta 6. Ohjelmistolla on mahdollista mm. mitoittaa kaapeleiden poikkipinta-alat, suojalaitteiden tyypit ja koot, laskea oikosulkuvirrat ja jännitteenalenemat ja asetella suojareleiden toiminta-arvot sekä varmistaa näiden toimivuus suunnitellussa sähköverkossa. [1]





**Kuva 6.** ABB e-Design ohjelmistolla toteutettu sähköverkon mallinnus.

Suunnittelutyön edetessä esiintyvien muutosten suunnittelu ja tarkistaminen oli ohjelmistoa hyödyntämällä nopeampaa ja mallinnus helpommin toteutettavissa, koska ohjelma näyttää mahdolliset suunnitteluvirheiden kohdat suoraan mallinnetun sähköverkon kaaviossa. Esiintyvät virheet värjätään eri värillä ja lisäksi erilliset virheilmoitukset ongelmien kuvauksineen kertovat mistä havaittu virhe johtuu.

Suurimmat haasteet laskennassa ja mallinnuksessa syntyvät ohjelmistoa käyttäessä silloin, kun käytetään myös jonkin muun valmistajan suojalaitteita. Perus verkonlaskennassa ei ohjelmistotasolla ole eroavaisuuksia, mutta suojalaitteita valittaessa ja niiden yhteistoimintaa ja selektiivisyyttä varmistettaessa tulee laskennassa soveltaa tarpeen tullen muuten vastaavia suojalaitteita kuin toisten valmistajienkin tuotteissa.

Tässä projektissa on esimerkiksi käytetty pääkeskustasolla ABB:n kompaktikatkaisijoita, kun taas pääkeskusten syöttämissä virtakiskoissa on käytetty Siemensin virranottimia. Vaikka näiden suojalaitteiden suojausalueiden virta-arvot ja suojausominaisuudet muuten vastaisivat toisiaan, on esimerkiksi eri valmistajien ilmoittamat rajoitetut virta-arvot kuitenkin toisistaan eroavat. Tästä syystä laskentatulosten varmentamista ja selektiivisyyden mallinnusta tehtiin tarpeen mukaan myös Siemensin SIMARIS laskentaohjelmistolla.

Sähköjakoalue verkko mallinnettiin ohjelmistoilla kokonaisuudessaan aina keskijännitekojeistosta pääkeskusten ja ryhmäkeskusten kautta loppukäyttäjän käytettävissä oleviin pistorasioihin asti. Työn aiheen kannalta oleelliset ohjelmistoilla laskettavat arvot ovat minimi- ja maksimioikosulkuvirrat sekä prospektiivinen ja rajoitettu dynaaminen oikosulkuvirta.

Ohjelmiston laskemista laskentatuloksista ei näe suoraan rajoitettua dynaamista oikosulkuvirtaa, vaan se tulee määrittää ohjelmistosta löytyvien virranrajoitusikärien perusteella

käyttäen apuna laskentatulosten prospektiivista oikosulkuvirran arvoa. Rajoitetun dynaamisen oikosulkuvirran arvoja määriteltäessä tulee huomioida verkossa käytettävän suojalaitteen valmistaja ja tyyppi, koska näillä tekijöillä on suuri vaikutus määritettyyn rajoitettuun arvoon.

### 3.3 Tulkinta

Katkaisijoiden suojareleiden asetteluissa tärkeimmät tiedot edellä kuvatuista oikosulkuvirtojen arvoista ovat maksimi ja minimioikosulkuvirtojen arvot. Ohjelmistolla lasketuista arvoista katsotaan maksimi 3-vaihe oikosulkuvirta ja minimi 1-vaihe oikosulkuvirta, jolloin näiden perusteella tiedetään asetella katkaisijat ottamaan huomioon kaikki esiintyvät viat ja silti toimimaan keskenään selektiivisesti. Tästä kerrotaan lisää selektiivisyyden kohdassa.

Maksimi oikosulkuvirta vaikuttaa kuitenkin myös itse suojalaitteen valintaan, koska valitun suojalaitteen tulee kyetä katkaisemaan vähintään maksimi oikosulkuvirran mukainen oikosulku. Lisäksi maksimaalisen prospektiivisen oikosulkuvirta-arvon perusteella määritellään rajoitettu dynaaminen oikosulkuvirran arvo, joka taas vaikuttaa suojalaitteen suojaamien keskusten ja näiden komponenttien valintaan. Suojalaitteen koosta riippuu, kuinka paljon dynaamista oikosulkuvirtaa rajoitetaan. Tällöin pääsääntöisesti suuremmalla suojalaitteen nimellisvirran arvolla laitteiston tulee kestää suurempaa oikosulkuvirtaa, koska suojalaitteen rajoittava vaikutus on pienempi.

Myös terminen oikosulkuvirran arvo on tärkeä tieto laitteistoa mitoitettaessa. Tämän työn kohteena olleessa projektissa oikosulkuvirrat olivat kuitenkin niin suuria, että käytännössä mitoitettavaksi tekijäksi jäi aina dynaaminen oikosulkuvirta. Eli maksimi oikosulkuvirran perusteella valitut komponentit kestivät aina jo lähtökohtaisesti termisen kestävyysvaatimukset.

ABB:n ja Siemensin laskentaohjelmistojen avulla saatuja tuloksia verrattiin keskenään tarpeen tullen kriittisimmissä paikoissa, jotta saatiin varmuus kummankin valmistajan tuotteilla toteutetun ratkaisun turvallisuudesta ja selektiivisyydestä. Pelkästään kaikkien keskusten ja näiden huoltosyöttöjen lukumäärä oli yhteensä pitkälti yli 1000 kappaletta. Lisäksi suurimmalle osalle näistä laskettiin arvoja normaalissa syöttötilanteessa, varavoimatilanteessa sekä huoltosyöttöjä käytettäessä, jonka takia erilaisia laskentatuloksia tuli erittäin suuri määrä. Tästä syystä ohjelmistoilla saaduista laskentatuloksista oleellimmat on päädytty esittämään tässä työssä aina tarpeen tullen tarkasteltavien kohteiden yhteydessä, jotta tuloksista saadaan ne oleellimmat esitettyä ja kuitenkin pidettyä työn rakenne aihealueen mukaisena.

Itse perus oikosulkuvirta-arvojen puolesta ei esiintynyt käytännössä eroavaisuuksia, mutta rajoitettujen dynaamisten virtojen välillä oli eroavaisuuksia varsinkin gG-sulakkeita tarkastellessa. Kun tarkastellaan ABB:n ohjelmistolla saatuja arvoja ja verrataan

niitä Siemensin vastaaviin, huomataan että esimerkiksi 630A gG kahvasulakkeella ABB antaa rajoitetuksi dynaamiseksi oikosulkuvirraksi huomattavasti pienemmän arvon kuin Siemens, kuten nähdään alla olevasta taulukosta 2.

**Taulukko 2.** Sulakkeiden rajoitetut dynaamisen oikosulkuvirran arvot

Laskentaohjelmisto ja tarkasteltu suojalaite	Maksimi prospektiivinen oikosulkuvirta $I_k$ / kA	Rajoitettu dynaaminen oikosulkuvirta $I_{p,raj}$ / kA
ABB, 630A gG kahvasulake	31,7	40,5
Siemens, 630A gG kahvasulake	31,7	47,4
ABB, 125A gG kahvasulake	21,4	12,5
Siemens, 125A gG kahvasulake	21,4	10

Kun taas tarkastellaan vastaavalla tavalla ohjelmistojen 125A gG kahvasulakkeelle antamia arvoja, huomataan että tässä tapauksessa ABB ilmoittaaakin Siemensin vastaavaa sulaketta isommat arvot. Tästä syystä laskennassa ja sen tuloksia tulkittaessa tuleekin sähköjakelujärjestelmässä, jossa käytetään useamman laitevalmistajan komponentteja, aina tarvittaessa käyttää useampaa valmistajakohtaista laskentaohjelmistoa tai yhtä useamman laitevalmistajan komponenttikirjastoja sisältävää laskentaohjelmistoa. Lisäksi tulee hyödyntää valmistajien omia selektiivisyystaulukoita ja erillisten teetettyjen laboratoriotestien tuloksia vertailussa. Näin pystytään saavuttamaan mahdollisimman hyvä ja turvallinen lopputulos sähköjakelujärjestelmän suojauksessa.

## 4. SELEKTIIVISYYS

Vikasuojauksen ja ylivirtasuojauksen toteutuminen on ehdoton vaatimus pienjännitesähköasennusstandardissa SFS 6000, mutta standardi ei kuitenkaan aseta ehdottomia vaatimuksia suojauksen selektiivisyyden tarkistamiselle yleisellä tasolla. Vaatimuksiin on lisätty, että oikosulku- ja ylikuormitussuojaukseen osallistuvien suojalaitteiden keskinäinen vaikutus tulee huomioida siten, että ne eivät vaikuta vahingollisesti asennuksien turvallisuuteen. Tiettyjen tilojen yhteydessä selektiivisyyden toteutuminen on kuitenkin erikseen vaadittu, tällaisia tiloja ovat esimerkiksi lääkintätilat. Selektiivisyys tulisi aina huomioon suunnittelussa, koska mitä laajempi sähköjakelujärjestelmä on ja mitä kriittisempiä sen syöttämät kulutuskohteet ovat turvallisuuden ja terveyden kannalta, sitä tärkeämmässä roolissa hyvin toteutettu suojauksen selektiivisyys on. [10; 17; 18]

SFS 6000 Pienjännitesähköasennukset -standardissa on määritelty toimenpiteet selektiivisyyden varmistamiselle. Tämän standardin [17] mukaan: ” *Selektiivisyyden varmistaminen pitää tehdä joko:*

- *kirjallisen aineiston tutkimuksella ottaen huomioon asianomaiset tuotestandardit ja valmistajan kirjallinen aineisto, tai*
- *sopivalla ohjelmistolla, johon valmistaja on toimittanut tiedot tätä erityistarkoitusta varten, tai*
- *asianomaisen tuotestandardin mukaisilla testeillä (joilla varmistetaan oikea testimenettely ja toistettavuus), tai*
- *valmistajan ilmoituksen perusteella.”*

Suojauksen selektiivisyydellä tarkoitetaan vian rajoittamista mahdollisimman pienelle alueelle, jolloin muu osa sähköjakelujärjestelmää pystyy silti toimimaan normaalisti. Selektiivisesti toimivan suojauksen kannalta on tärkeää tunnistaa vain oikeat todelliset viat. Ensisijaisesti ainoastaan suojalaitteen suojaamalla alueella tapahtuva vika saa aiheuttaa suojalaitteen toimimisen. Mikäli ensisijainen suojalaite ei jostakin syystä toimi, voi tällöin suojausketjussa seuraavana oleva laite toimia varasuojana ja varmistaa näin suojauksen toiminnan. Tällöin tulee ottaa huomioon kuitenkin riittävän ison toiminta-aika-portaan varmistaminen suojalaitteiden välillä, jotta ne eivät toimi päällekkäin mahdollisen vian esiintyessä. [12]

Suojaus voi toimia täysin selektiivisesti tai osittain selektiivisesti. Suojauksen ollessa täysin selektiivinen, toimii ainoastaan vikapaikan puoleinen suojalaite asennuskohdan suurimpaan prospektiiviseen oikosulkuvirtaan saakka. Mikäli suojaus on osittain selektiivinen, toimii ainoastaan vikapaikan puoleinen suojalaite vikavirtaan eli selektiivisyyden rajavirtaan saakka. Tällöin vikavirta on pienempi kuin asennuskohdan prospektiivinen

oikosulkuvirta. Täydellisen selektiivisyyden toteuttaminen ei aina ole tarpeen ja sen tavoittelemisen saattaa helposti johtaa järjestelmän kohtuuttomaan ylimitoitukseen. [10; 17]

## 4.1 Suojaustyypit

Selektiivisyyttä suunniteltaessa ja varmistettaessa tulee tietää minkälaista suojaustyyppiä kukin suojalaite toteuttaa ja mistä syystä. Pääsääntöisesti, kuten työn kohteena olleessa projektissakin, sama suojalaite hoitaa niin ylikuormitussuojauksen kuin oikosulkusuojauksenkin. Joissakin tapauksissa saatetaan käyttää ainoastaan esimerkiksi kaapelin ylikuormitussuojaa, jolloin suojausketjussa seuraavana oleva suojalaite hoitaa oikosulkusuojauksen.

Ylikuormitussuojaus on toteutettava kaikkialle sähköjakelujärjestelmän virtapiireihin niin, että ylikuormitusvirta katkaistaan ennen kuin lämpötila järjestelmän komponenteissa nousee liian suureksi. Yleensä ylikuormitusvirran kestopääte tulee mitoitusalueelta tehtäessä ensimmäiseksi vastaan kaapeleiden osalta, joiden ylikuormitussuojaukselle on standardissa SFS 6000 asetettu seuraavat ehdot. [12; 16]

$$I_B \leq I_N \leq I_Z$$

$$I_2 \leq 1,45 \leq I_Z$$

$I_B$  kuvaa piirin suunniteltua virtaa,  $I_Z$  on johtimen jatkuva kuormitettavuus ja  $I_N$  on suojalaitteen mitoitusvirta.  $I_2$  arvo on virta, jolla varmistetaan suojalaitteen toiminta suojalaitteelle määritellyssä tavanomaisessa toiminta-ajassa. Täten yllä olevien ehtojen mukaisesti varmistetaan, että suojattava kaapeli on mitoitettu varmasti kestävänsä suojattavan kohteen vaatimien toiminta-arvojen suuruudet. Tällöin monesti päädytään tilanteeseen, että rajoittavana tekijänä onkin lopulta keskuksen nimellisvirta. [16]

Toisena suojaustyyppinä on oikosulkusuojaus, jonka tehtävänä on varmistaa oikosulkuvirran katkaisu riittävän nopeassa ajassa. Yleisesti ottaen oikosulku tulee SFS 6000 standardin mukaan sähköjakelujärjestelmissä kytä poistamaan vähintään 5 sekunnissa, mutta yleensä pyritään paljon nopeampaan katkaisuun, mikäli mahdollista. Oikosulku tapahtuu yleensä kahden tai useamman eri potentiaalissa olevan jakelujärjestelmän osan välillä, kun osat kytkeytyvät pienen resistanssin tai impedanssin kautta toisiinsa. Tällaisia tilanteita syntyy yleensä johtuen eristeiden heikentymisestä, piirissä esiintyvistä ylijännitteistä, virheellisistä kytkentätoimenpiteistä tai komponenttien mekaanisista vaurioista. [12; 16]

Oikosulkusuojauksessa tulee huomioida erityisesti kussakin sähköjakelujärjestelmän osassa esiintyvät oikosulkuvirrat. Suojalaitteen tulee kytä katkaisemaan vähintään sen suojausalueella sähköjakelujärjestelmässä esiintyvän suurimman mahdollisen oikosulkuvirran mukainen oikosulkuvirta. Vastaavasti tulee varmistaa myös, että suojausalueella

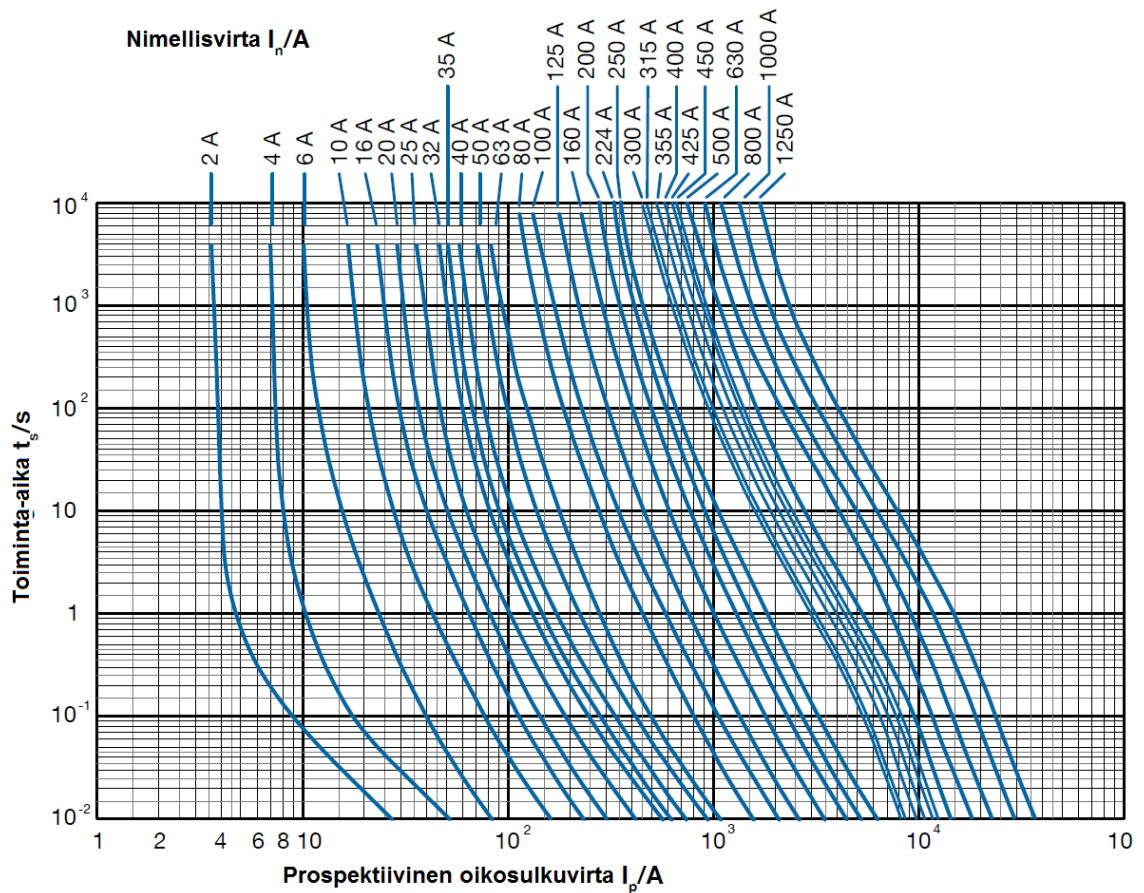
esiintyvä pienin mahdollinen oikosulkuvirta riittää suojalaitteen riittävän nopeaan toimintaan tai havahtumiseen, riippuen käytetäänkö sulakkeita tai katkaisijoita. [9; 12]

Suojalaitteen valinnassa tai asettelussa tulee huomioida myös sähkönjakelujärjestelmässä esiintyvät muut ilmiöt, jotka saattavat virran suuruudelta ylittää oikosulkusuojauksessa käytettävien arvojen puolelle. Oikosulkusuojaus ei saa toimia esimerkiksi moottorien käynnistysten yhteydessä tai niiden normaalin ylikuormituskäytön aikana. Vastaavasti muuntajan kytkentävirtasysäys, joka saattaa olla 8-12 kertainen muuntajan nimelliseen virtaan nähden, ei saa aiheuttaa oikosulkusuojauksen toimimista. [12; 22]

## 4.2 Sulakkeellinen suojaus

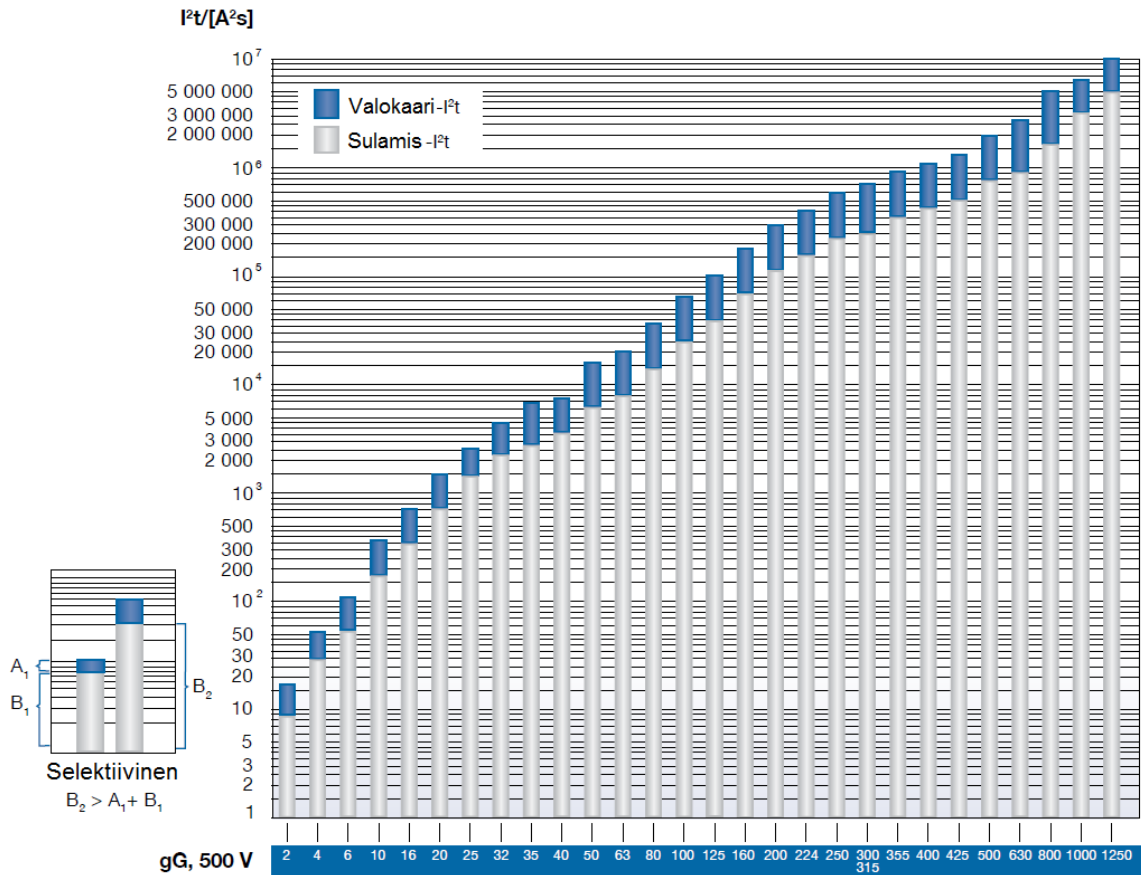
Sulakkeellinen suojaus on yksinkertainen tapa suojata sähkönjakelujärjestelmä ylikuormitus- ja oikosulkutilanteiden varalta. Sulakkeet ovat rakenteeltaan yksinkertaisia ja edullisia sekä tilanteessa kuin tilanteessa varmatoimisia. Rajoituksina on kuitenkin asettelemattomissa oleva toimintakäyrä, jolloin sovellettavuus on hyvin rajattua jo etukäteen. Toiminta-ajat ovat pitkiä verrattuna relesuojaukseen, varsinkin mikäli oikosulkuvirratt jäävät pieniksi. Lisäksi erilaisten poikkeustilanteiden huomioon ottaminen on hankalaa, koska tietyillä virroilla esiintyvät toiminta-ajat ovat vakioita. [9; 14]

Sulakkeiden tyyppimerkinnässä olevat kirjaimet kertovat millaiselle katkaisualueelle ja käyttökohteelle kyseinen suojalaite on suunniteltu. Tyyppimerkinnässä olevista kirjaimista ensimmäinen kuvaa sulakkeen katkaisualueutta. Kirjaimen ollessa g, on sulakkeella koko alueen kattava katkaisukyky, jolloin se soveltuu niin oikosulkusuojaksi kuin myös ylikuormitussuojaksi. Jos kirjaimena on a, on kyseessä vain osa-alueen katkaisukyvyyn omaava sulake, joka soveltuu ainoastaan oikosulkusuojaksi. Toinen kirjain ilmaisee käyttökohteen, G-kirjaimen tarkoittaessa johdonsuojauksessa käytettävää sulaketta ja vastaavasti M-kirjaimen tarkoittaessa moottorin suojaukseen käytettävää sulaketta. [2]



**Kuva 7.** 500V OFAF-sulakkeiden toiminta-ajat. [2]

Yllä olevasta kuvasta 7 on nähtävissä ABB:n 500A OFA sulakkeiden toiminta-aikoja. Vastaavanlaiset taulukot on saatavilla kullekin sulaketyypille ja koolle erinäisiltä valmistajilta. Taulukoiden avulla pystytään valitsemaan oikeanlainen sulake, joka toimii riittävän nopeasti verkossa esiintyvillä pienimmillä oikosulkuvirtojen arvoilla. Tämän lisäksi tulee varmistaa kuvan 8 mukaisesta  $I^2t$ -kuvaajasta valittujen sulakkeiden keskinäisen selektiivisyyden täyttyminen.

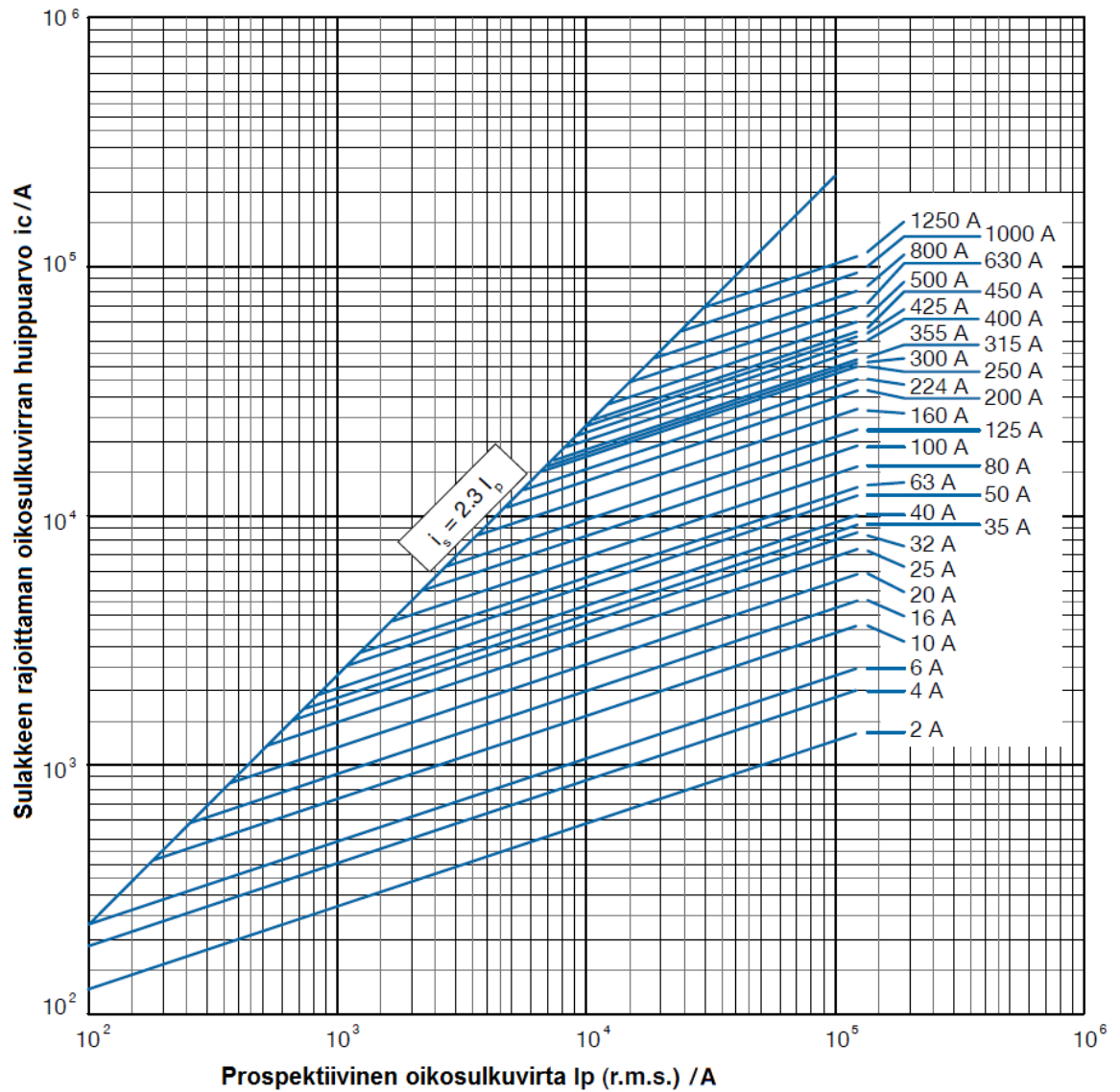


**Kuva 8.** 500V OFAF sulakkeiden selektiivisyys. [2]

Kuten kuvasta nähdään, jokaisella sulakkeella on sulamis- ja valokaariarvo  $I^2t$  kuvaamassa kunkin sulakekoon läpipäästämää energiamäärää. Jotta valitut sulakkeet olisivat keskenään selektiiviset, tulee alemman suojausportaan suojaavan sulakkeen yhteenlaskettujen  $I^2t$ -arvojen olla summaltaan matalampi kuin mitä ylempää suojausportasta suojaavan sulakkeen sulamis-  $I^2t$ -arvo on. Täten yleisesti joudutaan suojaavat sulakkeet valitsemaan vähintään yhden tai kahden portaan välein selektiivisyysvaateiden täyttämiseksi.

Lisäksi sulakkeellista suojausta määriteltäessä tulee ottaa huomioon sulakkeiden oikosulkuvirtaa rajoittavat ominaisuudet. Mikäli suojalaitetta joudutaan muuttamaan selektiivisyysvaateen vuoksi, tulee varmistua, että uusi suojalaitetyyppi rajoittaa oikosulkuvirtaa tarpeeksi suunniteltua muuta kojeistoa varten. Yleisesti ottaen sulakkeilla on erinomaiset virranrajoitusominaisuudet, johtuen niiden sisällä tapahtuvasta nopeasta valokaariresistanssin kasvusta. Rajoitettu oikosulkuvirran arvo voidaan määrittää kuvan 9 mukaisesti.





**Kuva 9.** 500V OFAF sulakkeiden virranrajoitus. [2]

Kuvaajassa tunnus  $i_s$  kuvaa oikosulkuvirran huippuarvoa. Kun tiedetään oikosulussa esiintyvä suurin mahdollinen prospektiivinen oikosulkuvirta, voidaan tämän avulla katsoa sulakkeen rajoittaman oikosulkuvirran arvo. Tällöin esimerkiksi 20 kA:n prospektiivisellä oikosulkuvirralla 160 A:n sulake rajoittaa oikosulkuvirran huippuarvon 15 kA:iin. Kätevintä rajoitetun arvon määrittäminen on kuitenkin tehdä erillisillä verkonlaskentaohjelmoistoilla, joista tulokset ovat selkeämmin ja nopeammin luettavissa. [1; 2]

### 4.3 Relesuojaus

Vaihtoehtoinen tapa sulakkeelliselle suojaukselle on katkaisijoiden käyttö, jotka ovat varustettuja suojareleilla. Myös kummankin suojalaitetyypin käyttö samassa sähköjakelujärjestelmässä on hyvin tavanomaista. Usein on edullisempaa ja yksinkertaisempaa toteuttaa suojaus käyttämällä ryhmäkeskustasolla sulakkeita sekä johdonsuojakatkaisijoita ja hoitaa sähköön pääjakelun suojaus katkaisijoiden avulla. Työn kohteena olleessa projektissa on päädytty kyseiseen ratkaisuun osittain kustannussyistä ja osittain suojauksen toiminnallisista syistä.

Suojaustavalla pystytään vaikuttamaan merkittävästi suojauksen toimintanopeuteen ja laajuuteen. Mitä nopeampi suojaus jakelujärjestelmään saadaan toteutettua, sitä pienemmiksi vikatilanteista aiheutuvat vahingot ja vaaratekijät jäävät. Lisäksi verkon termiset rasitukset jäävät lievemmiksi ja vian aiheuttama oikosulun aikainen jännitekuoppa jää kestoltaan lyhyemmäksi. Relesuojauksella on mahdollista toteuttaa nopeampi suojaus, varsinkin mikäli jakelujärjestelmässä esiintyvät oikosulkuvirrat jäävät pieniksi. Lisäksi muuttuvien toimintatilojen ja yllättävien tilanteiden huomioon ottaminen on helpompaa ja luotettavampaa katkaisijoita käytettäessä. [9; 22]

Selektiivinen sähköjakelujärjestelmän suojaus voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Työn kohteena olleessa projektissa on käytetty seuraavia suojaustapoja:

- Aika- ja virtaselektiivinen suojaus
- Lukitussuojaus
- Suunnattu suojaus
- Differentiaalisuojaus

#### 4.3.1 Aika- ja virtaselektiivinen suojaus

Jos halutaan toteuttaa relesuojaus yksinkertaisimmalla mahdollisella tavalla, se onnistuu silloin käyttämällä aikaselektiivistä suojausta. Tällöin suojauksen toiminta-aikoja porrastetaan riittävästi niin, että lähimpänä vikapaikkaa oleva katkaisija toimii ensin. Tällainen suojaus toimii parhaiten säteittäisverkoissa, jollainen myös työn kohteena olleen projektin sähköjakelujärjestelmä on periaatteeltaan. Aikaselektiivinen suojaus toteutetaan aina joko vakioaikaisena tai käänteisaikaisena. [5]

Vastaavasti suojaus voidaan toteuttaa myös käyttämällä pelkkää virtaselektiivistä suojausta. Tällöin suojauksen asetteluarvot on määritelty suojausalueilla esiintyvien vikavirtojen suuruuden mukaan, jolloin oletetaan suurimman vikavirran löytyvän lähinnä sähköjakeluverkon syöttöä olevalta suojalaitteelta. Jos oikosulkuvirrat jakelujärjestelmässä eivät vaihtelee kovinkaan paljon paikasta riippuen, ei virtaselektiivisen suojauksen selektiivinen toiminta ole mahdollista. Monesti paras suojaus saavutetaan käyttämällä sekä

aika- että virtaselektiivistä suojausta. Tällöin pystytään varmistamaan suojauksen toimivuus myös kohteissa, joissa vikavirran suuruus vaihtelee paljon vikapaikan sijainnin mukaan, mutta saattaa kuitenkin näkyä samansuuruisena useammalle samassa suojausketjussa olevalla suojalaitteelle. [5]

Katkaisijoiden suojareleissä voidaan niiden mallista ja tyypistä riippuen aika-asettelu määritellä vakio- tai käänteistoimintaiseksi erikseen niin ylikuormitusportaassa kuin oikosulkuportaassakin. Vakioaikaisessa suojauksessa aika-asettelu on nimensä mukaisesti vakio, jolloin katkaisija toimii yhtä nopeasti suurellakin vikavirtojen vaihtelualueella. Käänteisaikasuojauksessa taas vikavirran kasvaminen saa suojauksen toimimaan nopeammin mitä se toimisi pienemmillä vikavirran arvoilla. Kuvassa 10 on nähtävissä vakioaikaisen ja käänteisaikaisen suojauksen ero selektiivisyyskäyrässä oikosulkuportaassa.



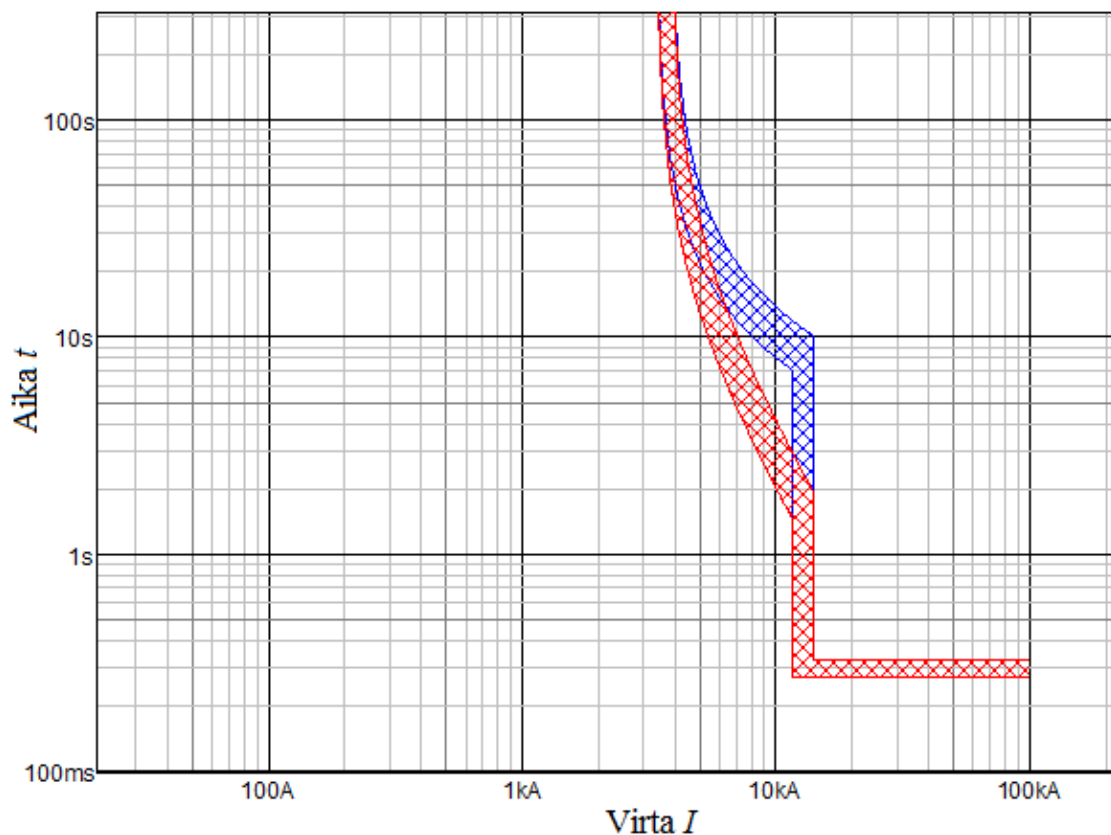
**Kuva 10.** Vakioaikaisen ja käänteisaikaisen asettelun ero

Kuten kuvasta nähdään, punaisella merkityn vakioaikaisen asettelun omaava katkaisija havahtuu pienempiin oikosulkuvirtoihin nopeammin kuin sinisellä merkitty käänteisaikaisesti aseteltu katkaisija. Kuvassa näkyvät kaksi katkaisijaa on aseteltu muuten täysin identtisesti, ainoastaan käyrän aikaselektiivisyyden toimintamalli eroaa. Vertailua tehtäessä tulee kuitenkin muistaa, että yleensä jompaakumpaa toimintamallia käytettäessä on jouduttu ottamaan myös muiden suojalaitteiden ja käyttötilanteiden luomia ehtoja huomioon, jolloin suoran vertailun tekeminen ei välttämättä käytännössä ole järkevää tai mahdollista.

Käänteisaikatoimintaiselle aika-asettelulle on määritelty neljä eri käänteisaikatoimintakäyrästä standardissa IEC 60255-3, IEC 60255-4 ja BS 142, nämä käyrästä ovat:

- Normal inverse
- Long time inverse
- Very inverse
- Extremely inverse. [9]

Nämä asetellut eroavat toisistaan käyrän jyrkkyyden puolesta. Esimerkiksi Very inverse -käyrästä (punaisella) on kulmaltaan paljon loivempi kuin Normal inverse -käyrästä (sinisellä), jolloin virran kasvaminen vaikuttaa selvemmin toiminta-ajan pienenemiseen, kuten nähdään alla olevasta kuvasta 11.



**Kuva 11.** Normal inverse- ja very inverse -käyrästä

Käänteisaikakäyrän mukainen laukaisu aika saadaan laskettua kaavalla 4

$$t = \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{I}{I>}\right)^{\alpha} - 1}, \quad (4)$$

jossa  $k$  on asetettava aikakerroin,  $I$  on vaihevirran arvo,  $I>$  on virta-asettelu ja  $\alpha$  sekä  $\beta$  ovat toimintakäyräkohtaisia vakioita. Nämä toimintakäyräkohtaiset vakiot ovat nähtävissä taulukosta 3. [9]

**Taulukko 3.** Toimintakäyräkohtaiset vakiot [1]

Toimintakäyrä	Toimintakäyräkohtainen vakio	
	$\alpha$	$\beta$
Normal inverse	0,02	0,14
Very inverse	1,0	13,5
Extremely inverse	2,0	80,0
Long time inverse	1,0	120,0

Edellä mainituissa standardeissa on määritelty havahtumisrajat, joiden tulee täyttyä suojauksen toiminnan varmistamiseksi. Long time inverse -toimintakäyrää käytettäessä suojauksen tulee havahtua viimeistään, kun mitattu virta ylittää 1,1-kertaisesti virta-asettelun. Käytettäessä normal, very tai extremely inverse -toimintakäyriä, on suojauksen havahduttava viimeistään 1,3-kertaisella virralla virta-asetteluun nähden. [9]

Käytettiinpä sitten käänteisaika tai vakioaikaista suojausta, tulee varmistaa suojalaitteiden välisten porrasaikojen riittävyys. Porrasajalla kuvataan sitä aikaa kahden suojalaitteen toimimisen välillä, joka vaaditaan suojausten selektiivisen toiminnan takaamiseksi. Tarkoituksena on siis varmistaa, että vian sattuessa lähinnä vikapaikkaa oleva suojalaite ehtii havahtumaan sekä toimimaan ensin ja vasta sitten vaihtoehtoinen suojalaite, mikäli ensimmäinen suojalaite epäonnistuu toiminnassaan. Tyypillisesti käänteisaikasuojausta käytettäessä joudutaan soveltamaan pidempiä porrasaikoja kuin vakioaikasuojausta käytettäessä. Tähän vaikuttaa esimerkiksi tarve ottaa huomioon virranmittauksen epätarkkuuden vaikutus toiminta-aikaan. [5; 9]

Porrasaikojen määrittäminen vakioaikaiselle ja käänteisaikaiselle suojaukselle tapahtuu kullekin omilla kaavoillaan. Usein valmistajien manuaaleista on saatavilla suoraan suositeltava porrassaika suojausketjussa käytettävien katkaisijoiden välille, jolloin kyetään suoraviivaisemmin tekemään tarvittavat porrastukset. Toisinaan on tarpeellista kuitenkin määrittää nämä ajat erikseen, kun sähköjakelujärjestelmässä on tyypillisistä toteutuksista poikkeavia ratkaisuja. Vakioaikaiselle suojaukselle saadaan määritettyä riittävä porrassaika kaavalla 5

$$\Delta t_{DT} = 2 \cdot t_E + t_R + t_{CB} + t_M, \quad (5)$$

jossa  $t_E$  kuvaa releen toiminta-ajan toleranssia,  $t_R$  retardaatiota eli pyörtöaikaa,  $t_{CB}$  katkaisijan toiminta-aikaa ja  $t_M$  varmuusmarginaalia. Pyörtöaika kuvaa aika-arvoa, kuinka paljon ennen suojauksen tulevaa toimimista suojalaitteen on palauduttava, jotta toimintapäätös peruutetaan. Varmuusmarginaalilla on tarkoitus ottaa huomioon esimerkiksi suojauksen toiminnan mahdollinen viivästyminen vikavirran DC-komponentin aiheuttaman virtamuuntajan kyllästymisen seurauksena. Katkaisijan toiminta-aika on tyypillisesti noin 50 millisekuntia, toiminta-ajan toleranssien ollessa 25 millisekuntia. Kun tähän huomioidaan tyypillinen retardaatioaika 30 millisekuntia ja varmuusmarginaalia 20 millisekuntia, saadaan porrassajaksi noin 150 millisekuntia. [9]

Käänteisaikatoimintaiselle suojaukselle saadaan määritettyä porrassaika vastaavalla tavalla, mutta hieman erilaista kaavaa 6 käyttämällä

$$\Delta t_{IDMT} = t_1 \cdot \left( \frac{1+E_1/100}{1-E_2/100} - 1 \right) + t_R + t_{CB} + t_M, \quad (6)$$

jossa edelliseen kaavaan 5 verrattuna on lisätekijöinä  $E_1$ ,  $E_2$  ja  $t_1$ .  $E_1$  kuvaa prosentteina kerrointa, jolla huomioidaan virranmittauksen epätarkkuuden aiheuttaman toiminta-aikavirheen ja toiminta-ajan toleranssin yhteisvaikutusta lähempänä vikapaikkaa sijaitsevassa releessä.  $E_2$  kuvaa prosentteina kerrointa, jolla huomioidaan virranmittauksen epätarkkuuden aiheuttaman toiminta-aikavirheen ja toiminta-ajan toleranssin yhteisvaikutusta suojausketjussa seuraavana olevaan releeseen.  $t_1$  kuvaa lähempänä vikapaikkaa olevan suojalaitteen laskennallista toiminta-aikaa. Näiden lisäksi käänteisaikaista suojausta käytettäessä tulee huomioida mahdollisen virranmittauksen epätarkkuuden vaikutusta toiminta-aikaan. Tyypillisesti kertoimet  $E_1$  ja  $E_2$  ovat suuruudeltaan 5-15 %, jolloin kaavan 5 yhteydessä esitettyjä aika-arvoja muille tekijöille käyttäen saadaan porrassajaksi noin 350 millisekuntia. [9]

Edellä mainituilla keinoilla on mahdollista varmistaa yksittäisten suojausketjujen selektiivinen toiminta ja pienempien sähkönjakelujärjestelmien suojauksien toimivuus, mutta isommassa mittakaavassa virheiden mahdollisuus ja laskentatyön määrä kasvaa äkkiä suhteettoman isoksi. Lisäksi kesken suunnittelutyön tehtävät jakelujärjestelmän rakenteen ja suojalaitteiden tyyppien muutokset tekevät määrittelystä helposti monimutkaista ja useita iterointikierrroksia vaativaa. Tästä syystä on nykyisin järkevintä tehdä selektiivisen suojauksen mallinnus ja varmennus tietokoneella käytettäviä laskentaohjelmistoja soveltaen. Näin pystytään ottamaan huomioon kaikki tekijät pienintäkin muuttujaa myöten sähkönjakelujärjestelmässä ja reagoimaan nopeasti tarvittaviin muutoksiin.

#### 4.3.2 Asetteluarvojen määrittäminen

Suojareleiden asetteluarvojen määrittäminen tapahtuu luotettavimmin käyttämällä valmistajien tai riippumattomien tahojen tarjoamia laskentaohjelmistoja. Työn kohteena olleessa projektissa käytetyissä laskentaohjelmistoissa suojareleiden asettelu tapahtuu niin ABB:n kuin Siemensinkin versiossa erillisessä asettelutilassa. Tällöin voidaan verrata useiden peräkkäisten ja/tai rinnakkaisten suojalaitteiden selektiivisyyskäyrästä sekä tehdä tarvittavia muutoksia asetteluarvoihin. Lisäksi ohjelmistojen laskemat oikosulkuvirrat ovat suoraan tarjolla määrittelyjen perusteeksi ja ohjelmistoilla on tarkistettavissa määritettyjen asetteluarvojen toimivuus kaikissa eri kytkentätilanteissa. Näin voidaan tarkasti verrata tehtyjen asetteluarvojen muutosten vaikutus koko sähkönjakelujärjestelmässä.

Suojalaitteiden asettelut pyritään tekemään niin, että selektiivisyyskäyrästä eivät risteä keskenään, jolloin voidaan saavuttaa täysin selektiivinen suojaus. Kun samassa käyrästä tarkistellaan esimerkiksi pien- ja keskijänniteverkon suojalaitteiden selektiivisyyttä,

tulee muistaa ottaa huomioon mahdollisten virtamuuntajien muuntosuhteet ja suhteuttaa asetteluarvot oikeassa suhteessa toisiinsa. Lisäksi tulee suhteuttaa asetteluiden perusteena käytettävien oikosulkuvirtojen arvot keskijännitetasolta pienjännitetasolle. Vain tällöin pystytään vertaamaan eri jännitetasojen välisten suojalaitteiden todellista selektiivisyyttä. Asetteluarvot määritellään kolmelle erilliselle suojausportaalle, jotka ovat ylikuormitus-suojaus I>, oikosulkusuojaus I>> ja hetkellinen oikosulkusuojaus I>>>. Yleensä jokaiselle näistä asetellaan yhdet arvot, mutta suojalaitteen tyypistä riippuen on joissakin tapauksissa mahdollista asetella useampia asetteluarvoja jokaiseen suojausportaaseen. [5]

Suojalaitteiden asetteluarvoja määritettäessä ja erilaisten suojalaiteyhdistelmien yhteensopivuutta tarkasteltaessa on hyvä käyttää valmistajien tarjoamia selektiivisyystaulukoita hyödyksi. Niissä on määritelty mitkä suojalaiteyhdistelmät saadaan toimimaan täysin selektiivisesti yhteen ja onko joillakin suojalaiteyhdistelmillä tietty selektiivisyysrajavirta, jonka yläpuolella ei selektiivistä suojauksen toimintaa voida taata. Alla olevassa kuvassa 12 on esimerkki tällaisesta taulukosta, jossa on esitettyä Siemensin 3VA2-sarjan kompaktikatkaisijan selektiivisyys 3NA-sarjan gG-sulakkeiden kanssa.

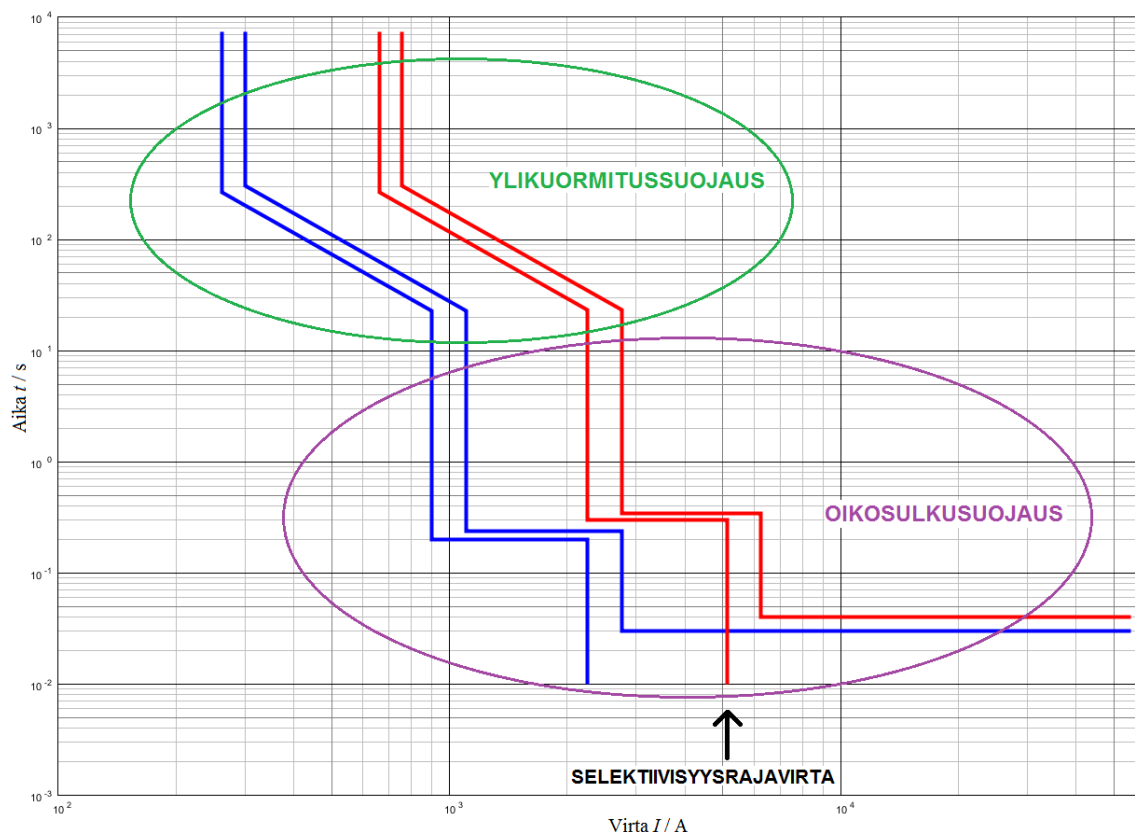
SIEMENS AG Limit current with selectivity Is [kA] for 230 / 400V AC acc. to IEC 60947-2  edition 05/2018		upstream molded case circuit breaker 3VA2 *)															
		line protection															
		trip unit	ETU320 / ETU330 / ETU340 / ETU350 / ETU550 / ETU560 / ETU850 / ETU860														
		frame size	160 A				250 A	400 A		630 A							
		I <sub>co</sub> [kA]	55 / 85 / 110														
		I <sub>in</sub> [kA]	U <sub>n</sub> [V]	frame size	I <sub>n</sub> [A]	25	40	63	100	160	160 250	250	400	400	500	630	
downstream NH-fuse 3NA	utilization category gG	120	400 / 500 / 690	000	2, 4, 6, 10, 16, 20	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	
					25,32			T	T	T	T	T	T	T	T	T	
					35, 40, 50				T	T	T	T	T	T	T	T	
					63, 80					T	T	T	T	T	T	T	
					100						T	T	T	T	T	T	
					125							T	T	T	T	T	
				00	160								T	T	T	T	T
					35, 40, 50				T	T	T	T	T	T	T	T	T
					63, 80						T	T	T	T	T	T	T
					100, 125							T	T	T	T	T	T
					160								85	T	T	T	T
					6, 10, 16, 20	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
		0	25, 32			T	T	T	T	T	T	T	T	T	T		
			35, 40, 50				T	T	T	T	T	T	T	T	T		
			63					T	T	T	T	T	T	T	T		
			80						T	T	T	T	T	T	T		
			100, 125							T	T	T	T	T	T		
			160								85	T	T	T	T		
		1	16, 20	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
			25			T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
			35, 40, 50				T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
			63					T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
			80						T	T	T	T	T	T	T	T	T
			100, 125							T	T	T	T	T	T	T	T
160									85	T	T	T	T	T	T		
200									85	T	T	T	T	T	T		
224, 250										T	T	T	T	T			

**Kuva 12.** Siemens selektiivisyystaulukko. [19]

Kuvassa ylhäällä on esitettynä suojausketjussa ylemmäksi sijoittuva suojalaite ja vasemmalla puolella taas suojausketjussa alemmaksi sijoittuva suojalaite. Kuten kuvasta nähdään, on esimerkiksi 160 A:n katkaisija aseteltavissa täysin selektiivisesti 00-koon 63 A:n gG-sulakkeen kanssa. Jos haluttaisiin esimerkiksi 250 A:n katkaisija selektiiviseksi 160

A:n gG-sulakkeen kanssa, ei alemman suojalaitteen sijainnissa esiintyvä prospektiivinen oikosulkuvirta saa olla tällöin selektiivisyysrajavirtaa 85 kA suurempi. Muille suojalaitteyhdistelmille voidaan arvot katsoa vastaavasti niille määritellyistä taulukoista. [19]

Alla olevassa kuvassa 13 näkyy esimerkki kahden peräkkäisen katkaisijan selektiivisyyskäyrästä. X-akselilla on kuvattuna suojareleen asettelu virta-arvot ja Y-akselilla puolestaan suojareleen asettelu aika-arvot. Selektiivisyyskäyrät koostuvat kahdesta pääalueesta, ylikuormitussuojauksesta (vihreällä) ja oikosulkusuojauksesta (violetilla). [5]



**Kuva 13.** Suojalaitteiden selektiivisyyskäyrät

Kuten kuvasta nähdään, peräkkäiset suojalaitteet on aseteltu virta- ja aikaselektiivisesti. Tässä tapauksessa lähimpänä mahdollista vikapaikkaa oleva suojalaite on kuvattu sinisellä käyrällä ja puolestaan lähimpänä jakelujärjestelmän syöttöä oleva suojalaite on kuvattu punaisella käyrällä. Mikäli prospektiivinen oikosulkuvirta lähimpänä vikapaikkaa olevan suojalaitteen sijainnissa jää alle selektiivisyysrajavirran, saavutetaan täysin selektiivinen suojaus. Jos taas prospektiivinen oikosulkuvirta ylittää selektiivisyysrajavirran, on suojaus osittain selektiivinen. Tällöin selektiivisyysrajavirtaa suuremmilla oikosulkuvirran arvoilla ei voida taata lähimpänä vikapaikkaa olevan suojalaitteen ensisijaista toimintaa. [5; 10]



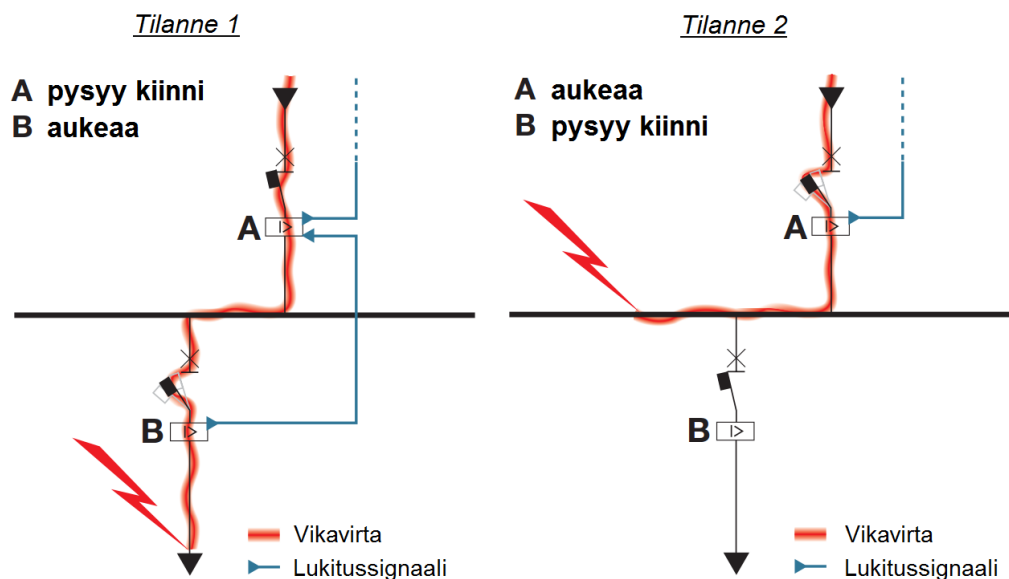
### 4.3.3 Lukitussuojaus

Lukitussuojauksen ideana on nimensä mukaisesti lukita suojalaitteiden suojaukset toisiinsa, jolloin selektiivisyys saavutetaan tehtyjen lukituksien mukaisesti. Tätä suojaustapaa käytetään, kun esimerkiksi asetteluarvojen määrittely selektiiviseksi ei ole mahdollista käytössä olevien toiminta-aikarajojen puolesta, kuten työn kohteena olleessa projektissa. Yleisesti ottaen lukitussuojausta käytettäessä tarkoituksena on nopeuttaa suojauksen toimintaa, joskin yleensä suojausportaisiin asetetaan aina hieman viivettä suojauksen luotettavan toiminnan varmistamiseksi. Yleisesti ottaen lukitussuojausta käytetään koh-teissa, joissa on suuret nimellis- ja oikosulkuvirrat. [5; 9]

Lukitussuojausta voidaan lähtökohtaisesti käyttää verkon rakenteesta riippumatta missä vain, mutta parhaiten se sopii käytettäväksi säteittäisverkoissa. Tällöinkin tulee huomioida mahdollisen takasyötön mahdollisuus ja ottaa suojalaitteen ”takaa” tulevan vikavirran mahdollinen vaikutus huomioon suojauslaitteiden asetteluissa. Tarvittaessa tällöin saatetaan joutua käyttämään suunnattua suojausta lisänä, jotta välttyään virheellisiltä suojauksien toimimisilta tai vaihtoehtoisesti säätämään asetteluiden virta-arvojen keskinäistä suhdetta eri suojalaitteiden välillä. Mikäli lukitussuojausta käytetään rengas- tai silmukaverkoissa, tulee aina käyttää myös suunnattuja ylivirtasuojia tai distanssisuojia, jotta varmistetaan suojauksen luotettava oikeanlainen toiminta joka tilanteessa. [5; 9]

Kuten muutenkin suojauksen asetteluarvojen aika-arvoja määritettäessä, tulee myös lukitussuojauksen aika-arvoja asetellessa huomioida riittävän toimintaviiveen pituus, jotta suojalaitteet toimivat oikeassa järjestyksessä. Tällä varmistetaan, että vikaa lähinnä oleva suojalaite ehtii havaitsemaan vian ja lähettämään lukitustiedon lukitusketjussa seuraavana oleville suojalaitteille, jotta nämä eivät toimisi ennen ensisijaista suojalaitetta. Toimintaviiveen pituuteen vaikuttavat lukituksen antavan suojalaitteen havahtumisaika, lukittavan suojalaitteen sisäänmenopiirien vasteaika ja lukittavan suojalaitteen retardaatio- eli pyörtöaika. Edellä mainitut tekijät huomioon otettaessa, on tavanomaisesti toimintaviiveen pituus noin 100 ms käytettäessä perinteisiä lukitustapoja. Nykyisin kuitenkin käytössä on vielä nopeampiakin tapoja, kuten GOOSE-lukitusviestit, joilla toimintaviivettä voidaan pienentää entisestään. [5; 9]

Kuvassa 14 on esitettyä kaksi eri tilannetta, kuinka lukitussuojaus toimii vikapaikan sijainnista riippuen. Kuvaan on esitettyä kaksi suojalaitetta A ja B, jotka ovat osa laajempaa lukitusketjua. Alempi katkaisija B kuvaa yksittäistä lähtökatkaisijaa ja ylempi katkaisija A taas useamman lähtökatkaisijan käsittävää jakelukiskoa syöttävää pääkatkaisijaa. Tilanteessa 1 vika sattuu yksittäisen lähtökatkaisijan lähdössä jossakin kohtaa suojalaitteen suojaamalla verkon osalla. Tilanteessa 2 vika sattuu yksittäisiä lähtökatkaisijoita syöttävässä jakelukiskossa pääkatkaisijan suojaamalla verkon osalla. Kummassakin tilanteessa suojauksen halutaan toimivan selektiivisesti ja mahdollisimman vähän häiriöitä sähkönjakelujärjestelmään aiheuttaen.



**Kuva 14.** Lukitussuojauksen toiminta eri tilanteissa [5]

Kuten kuvasta nähdään, tilanteessa 1 vian sattuessa yksittäisen lähtökatkaisijan B suojausalueella, lähettää suojalaite lukitusignaalin lukitusketjussa seuraavana olevalle jakelukiskon pääkatkaisijalle A. Tällöin katkaisija A tietää, että katkaisija B hoitaa vikatilanteen eikä turhaan katkaise virtaa koko jakelukiskolta. Vastaavasti lukitusignaali kulkee lukitusketjussa edelleen myös yläpuolisille katkaisijoille, jotta nämäkään eivät toimisi vian sattuessa turhaan, mikäli vika näkyy yläpuolisille suojalaitteille asti. Tilanteessa 1 siis ainoastaan yksittäinen viallinen lähtö erotetaan vika-alueen pysyessä mahdollisimman pienenä. Tilanteessa 2 taas vian sattuessa jakelukiskossa pääkatkaisijan A suojausalueella, ei voida enää vikapaikkaa pitää yhtä pienenä. Tällöin ei kuitenkaan katkaisijan B tarvitse toimia, koska vian poissulkeminen tapahtuu katkaisijan A toimesta. Katkaisija A lähettää lukitusignaalin edelleen lukitusketjussa seuraavana oleville katkaisijoille, varmistaen näin vikapaikan mahdollisimman tarkan rajauksen ja ehkäisten muiden yläpuolisten suojalaitteiden turhan toimimisen. [5]

Edellä esitetyissä tilanteissa tulee miettiä mahdollisen katkaisijavikasuojan tarpeellisuutta, riippuen kuinka kriittisestä sähköjakelujärjestelmän osasta on kyse. Katkaisijavikasuojaus toteutetaan suojalaitteen tyypistä riippuen joko erillisellä suojalaitteeseen liitettävällä lisäosalla tai asettelemalla katkaisijavikasuojaus katkaisijan suojausalueen parametreista päälle. Katkaisijavikasuojalla varmistetaan suojauksen toimivuus, mikäli lukitusignaalin antanut suojalaite jostakin syystä vikaantuu eikä pysty katkaisemaan vikaa jakelujärjestelmästä pois. Vian katkaisemisen hoitaa tällöin suojausketjussa seuraavana oleva suojalaite, joka saa käskyn toimia katkaisijavikasuojalta samaa tiedonsiirtoväylää pitkin, jossa lukitussignaalitkin välittyvät. Katkaisijavikasuojalla on mahdollista saada suojaus seuraavalla suojalaitteella toimimaan nopeammin kuin käyttämällä esimerkiksi seuraavana olevan suojalaitteen ylikuormitusporrasta varasuojana, koska tällöin seuraavana olevan suojalaitteen nopeammin toimiva oikosulkuporras ei ole lukittuna. [5; 9]

Lukitusuojauksen käyttöä määritettäessä tulee miettiä sen todellista tarvetta selektiivisyyden saavuttamiseksi. Normaaliin aikaselektiiviseen suojaukseen verrattuna sillä saavutetaan tyypillisesti paljon nopeammat suojauksen toiminta-ajat, parhaimmillaan noin 15-20 millisekuntia, jonka seurauksena myös vikojen aiheuttamat tuhot kojeistoissa ja komponenteissa sekä niiden kesto jakelujärjestelmässä pienenee. Lisäksi suojaus on mahdollista rakentaa ottamaan huomioon hyvin monta eri selektiivisyystasoa ja taata näin suojauksen selektiivisyys myös poikkeustilanteissa. [5]

Haasteina on kuitenkin aina kustannuksien kasvaminen, koska suojalaitteen mallista riippuen lukitustoiminnot eivät välttämättä ole vakio toimintoja. Lisäksi lukituksien määrittäminen ja konfiguroiminen on haastavaa ja aikaa vievää, varsinkin järjestelmän koon ja eri selektiivisyystasojen määrän kasvaessa. Tämä lisää entisestään toteutuksen kustannuksia ja lisää myös mahdollisuutta konfiguroinneissa tapahtuviin virheisiin, joskin asetteluarvojen mallinnus laskentaohjelmistoilla auttaa karsimaan näistä yleensä valtaosan pois.

#### 4.3.4 Muut suojaustavat

On hyvä tiedostaa, että yllä aiemmin esiteltyt suojaustavat eivät ole relesuojauksen yhteydessä ainoat mahdolliset suojaustavat. Tässä työssä on päädytty käsittelemään kuitenkin perusteellisemmin vain edellä mainittuja suojaustapoja, koska ne liittyivät varsinaiseen omaan osuuteeni projektista eniten. Tämän lisäksi mahdollisia suojaustapoja ovat suuntaselektiivinen suojaus, impedanssiselektiivinen suojaus, distanssisuojaus ja differentiaalisuojaus. Näistä varsinkin distanssisuojaus ja differentiaalisuojaus ovat jo itsessään hyvin laajoja aiheita ja toteutustapoja on hyvin monenlaisia käyttökohteesta riippuen.

Suuntaselektiivinen suojaus on tarpeen käytettäessä rengas ja silmukkaverkkoja, jotta suojaus toimii oikein sen mukaan, onko vikapaikka suojalaitteen edessä vai takana. Suojauksen toiminta-aikaa on mahdollista tällöin säätää vikapaikan sijainnin mukaan. Suojaus voidaan määritellä myös toimimaan vain vikavirran kulkiessa tiettyyn suuntaan, jolloin esimerkiksi suojalaitteen edessä olevat viat eivät aiheuta suojauksen toimimista. Tällainen tilanne saattaa syntyä verkoissa, joissa on hajautettua varavoimaa, jolloin virran suunnat vaihtelevat käyttötilanteen mukaisesti. [5; 9]

Impedanssiselektiivinen suojaus auttaa tietyissä tapauksissa oleellisesti nopeuttamaan suojauksen toimintaa, mikäli vikapaikka sijaitsee lähellä suojalaitetta. Toiminta-ajat voidaan periaatteessa asettaa tämän suojaustavan yhteydessä minimiin, koska suojalaitteet toimivat ainoastaan impedanssiasettelujen määräämillä suojausalueilla. Tällöin suojausalueet eivät kuitenkaan peitä toisiaan, jolloin rinnalla joudutaan käyttämään myös aika-selektiivistä suojausta. Lisäksi asetteluihin vaikuttavat mm. mittamuuntajien virheet, epä-tarkkuudet verkon impedanssitiedoissa, keskinäisnollainduktanssi rinnakkaisten johtojen välillä ja vikaresistanssin aiheuttama mittausvirhe. Tästä syystä suojaus ei voi yleensä

kattaa kuin noin 80-90 % suojalaitteen ja suojausketjussa seuraavana olevan suojalaitteen välisestä impedanssista käytettäessä ali-impedanssisuojausta. [5; 9]

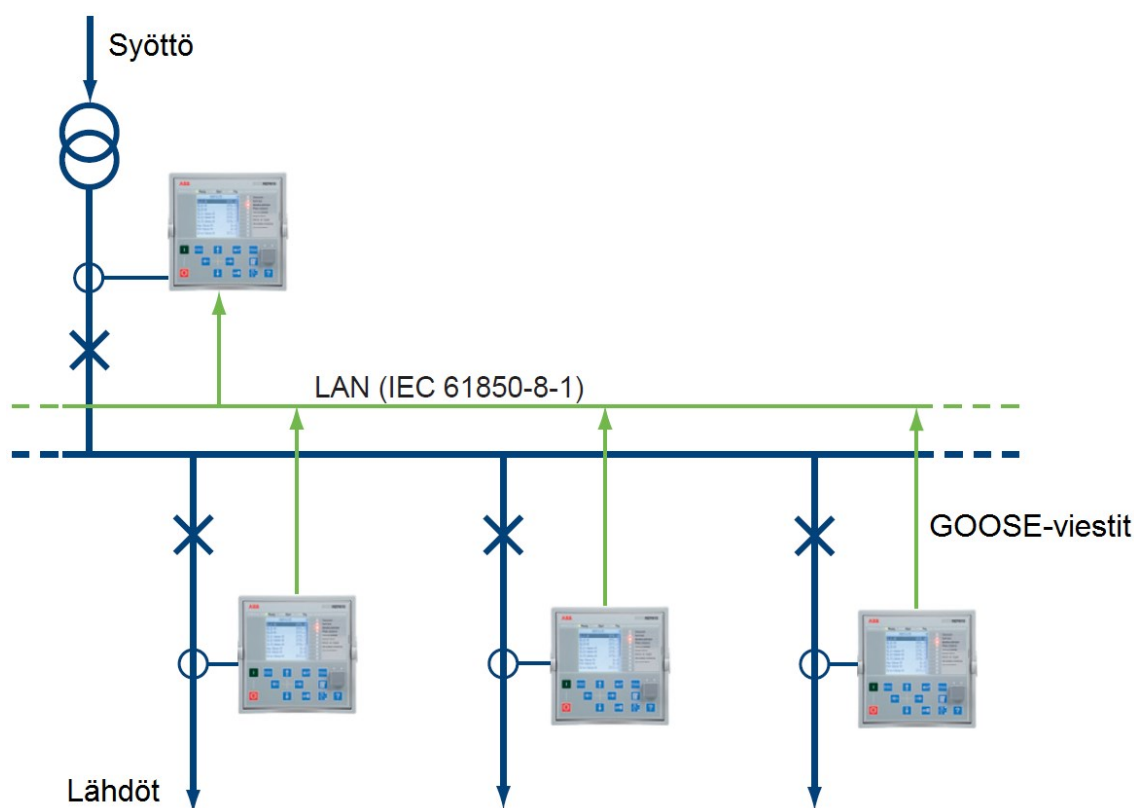
Impedanssisuojausta pidemmällä hyödyntävä suojaus on distanssisuojaus, joka perustuu toimintasuunnan mukaisesti määriteltuihin vyöhykkeisiin. Toiminta perustuu edelleen myös verkon impedanssien mittaamiseen, mutta tämän lisäksi käytetään myös suunta-selektiivistä suojausta. Vyöhykkeistä pienimmät eivät ulotu seuraavan suojalaitteen ylitse, mutta laajimmat ottavat huomioon tapahtumat vähintään myös seuraavan suojalaitteen pienimmällä suojausalueella. Tällöin vaaditaan kuitenkin suojalaitteiden välille viestintää ja lukituksia, jotta vikapaikan sijainnista ja vikavirran suunnasta riippuen oikeat suojalaitteet toimivat oikeassa järjestyksessä. Näin on mahdollista toteuttaa hyvin kattava suojaus, joka ottaa huomioon useita eri kytkentätilanteita. Tällaiset suojaukset ovat kuitenkin pääsääntöisesti käytössä siirtoverkoissa, rengas- ja silmukkaverkoissa sekä heikoissa säteittäisverkoissa. [9]

Differentiaalisuojausta voidaan hyödyntää hyvin monissa erilaisissa käyttökohteissa ja sillä pystytäänkin suojaamaan käytännössä kaikki sähkön jakelujärjestelmän eri osat. Näitä ovat esimerkiksi muuntajat, kiskostot ja johdot, lisäksi erilaisia suuria ja/tai herkkiä koneita pystytään suojaamaan tällä menetelmällä. Suojaustapana tämä on hyvin tarkka ja sitä myöten myös nopea, jo muutaman prosentin suuruiset vikavirrat nimellisvirtaan nähden havaitaan. Differentiaalisuojan toiminta perustuu suojattavaan kohteeseen tulevien virtojen vertaamiseen siitä lähteisiin virtoihin. Toiminta voi perustua joko pienimpedanssi- tai suurimpedanssiperiaatteeseen, mutta käytännössä suojaus joka tapauksessa vertaa aina tulevien ja lähtevien virtojen poikkeavuutta joko amplitudin tai vaihekulman tai näiden molempien välillä. Kun näiden poikkeavuus ylittää suojareleeseen asetellut asetusarvot, suojalaite toimii ja katkaisee havaitsemansa vian pois. Koska virtoja mitataan vain suojattavan kohteen osalta, ei suojaus havaitse tämän ulkopuolella esiintyviä vikoja, tästä syystä suojaus on vain absoluuttisesti selektiivinen. [9]

#### 4.4 GOOSE-viestit

Työn kohteena olleessa projektissa yksi keskeinen osa selektiivisyyttä oli lukitussuojauksessa käytetyt GOOSE-viestit eli Generic Object Oriented Substation Event -viestit. GOOSE-viestit on määritelty erikseen globaalissa IEC 61850 -standardissa, joka on siis Tietoliikenneverkot ja -järjestelmät sähköasemalla -standardi (Communication Networks and Systems In Substations). Standardin tarkoituksena on mahdollistaa eri valmistajien laitteiden ja järjestelmien keskinäinen viestintä yhdenmukaistettua järjestelmää käyttäen ja päästä näin eroon valmistajakohtaisista sovellutuksista sekä ylimääräisistä eri protokollien välisistä muunnoksista. Standardi on tehty tulevaisuutta ajatellen niin, että tietojen ja palvelujen käsittely pyritään eriyttämään kulloinkin käytettävästä tiedonsiirtotavasta. Tämä mahdollistaa standardin käytön myös jatkossa tiedonsiirtotekniikoiden edelleen kehittyessä. [4]

IEC 61850:n mukainen tiedonsiirto perustuu tällä hetkellä jo pitkään käytössä olleeseen Ethernet-lähiverkkotekniikkaan, joka mahdollistaa luotettavasti suuret tiedonsiirtokapasiteetit ja -nopeudet. Näin ollen GOOSE-viesteillä saavutetaan hyvin nopeat lukitussuojauksen toiminnot, nopeimmillaan lukitukset saadaan toimimaan laitteiden välillä alle 10 millisekunnissa. Tämä on parhaimmillaan n. 50% nopeammin kuin tyypillisesti fyysisesti johdottamalla toteutetussa lukitusjärjestelmässä. Lukituksien lisäksi GOOSE-viesteillä voidaan nimensä mukaisesti (Generic = Any data) siirtää myös mitä tahansa muuta tietoa, kuten mittaus-, hälytys- ja laukaisutietoja sekä I/O-tietoja. GOOSE-viestit toteuttavat horisontaalista tiedonsiirtoa suoraan suojalaitteiden välillä ilman, että ne viestit kiertäisivät esimerkiksi erillisen palvelimen kautta. Alla olevassa kuvassa 15 näkyy järjestelmän toteuttamisperiaate. [4; 11]



**Kuva 15.** GOOSE-järjestelmän toteutusperiaate. [4]

Kuten kuvasta nähdään, on tiedonsiirtojärjestelmän rakenne hyvin yksinkertainen ja tästä syystä käytännössä helppo toteuttaa. Oman haasteensa tuo kuitenkin laitteiden toiminnan konfigurointi ohjelmallisesti, joskin tällä on myös lukuisia hyviä puolia. Perinteiseen ”kovakaapeloinnilla” toteutettuun järjestelmään verrattuna saavutetaan selviä kustannussäästöjä, koska kaapelointi vähenee toteutusvaiheessa ja myöhemmissä muutostilanteissa muutokset voidaan hoitaa ohjelmallisesti ilman mekaanisia kytkentämuutoksia. Lisäksi, kuten aiemmin mainittu, samassa väylässä saadaan kulkemaan paljon muutakin tietoa, jolloin yhdellä sovellutuksella pystytään hoitamaan useampaa koko järjestelmään liittyvää toimintoa. [4; 11]

GOOSE-viestien avulla toteutetusta lukituksesta saadaan rakennettua hyvin joustava järjestelmä, jota pystytään helposti sopeuttamaan tuleviin muutoksiin myös jatkossa ja monistamaan sellaisenaan myös uusiin vastaaviin sovellutuksiin. Lisäksi selvänä etuna perinteisiin johdotettuihin järjestelmiin verrattuna on väylien reaaliaikainen valvonta vikojen varalta, jolloin turvallisuus ja käyttövarmuus paranevat. Perinteinen johdotettu järjestelmä voi vikaantua ilman varoitusta niin, että vika tulee esiin vasta mahdollisessa vika-tilanteessa suojausten toimimattomuuden kautta. GOOSE-järjestelmässä väylän toimintaa kuitenkin valvotaan koko ajan, jolloin mahdollinen järjestelmässä esiintyvä vika tulee tietoon saman tien. Myös koetuksessa tapahtuva järjestelmän testaaminen on paljon helpompaa automaattisilla testausohjelmistoilla verrattuna perinteiseen ”kovakaapeloinnin” testaamiseen. [4]

GOOSE-järjestelmän konfigurointi on perinteiseen johdotettuun järjestelmään verrattuna tietyiltä osin monimutkaisempaa. Asettelut ja järjestelmän saattaminen yleisesti toimintakuntoon vaatii ammattitaitoa, jotta ohjelmistoja osataan käyttää oikein ja saavutetaan luotettavasti sekä oikein toimiva kokonaisuus. Suojalaitteen valmistajasta riippuen ohjelmistojen käyttölogiikka saattaa erota hyvinkin paljon toisistaan, jolloin työn kohteenakin olleen projektin kaltaisessa eri laitevalmistajien komponentteja yhdistelevässä järjestelmässä tarvitaan kattavaa osaamista eri ohjelmistoista ja niiden erikoistoiminnoista.

## 5. KESKIJÄNNITEVERKON SUOJAUKSET

Keskijännitekojeiston suojaukset ovat normaalin sähkönsyötön varmistamisen kannalta tärkein kohta sähköjakelujärjestelmässä. Ilman keskijänniteverkon syöttöä ei minkäänlainen huoltosyöttöjenkään hyödyntäminen onnistu, vaan tällöin joudutaan aina turvautumaan varavoimaan. Kuten jo aiemmin mainittu, koostuu sähköjakelu keskijänniteverkon kolmesta keskijännitekojeistosta, joille jokaiselle tulee oma syöttö sähköasemalta. Normaalissa käyttötilanteessa vain yksi syöttö on käytössä, jolloin muut kaksi kojeistoa ovat rengassyöttöjen kautta yhdistetty kyseiseen syöttävään kojeistoon. Kappaleen 2 kuvasta 1 on nähtävissä kaaviokuva kojeistojen perusrakenteesta.

Ulkopuolisilla sähköasemilla olevien lähtökatkaisijoiden suojaraleiden asettelut ovat erittäin tiukat, nämä ovat nähtävissä taulukosta 4. Sähköasemalta kojeistolle 1 tulevan liittymän lähtökatkaisijan suojaraleen virta-arvo on ylikuormitusportaan  $I >$  osalta pienin, muuten asetteluarvot ovat lähtökatkaisijoiden osalta samansuuruiset. Oikosulkuportaan  $I >>$  aika-arvo on ainoastaan 1 sekunti, jonka takia koko laitoksen sähköjakelujärjestelmän selektiivisyyden toteuttamisesta tuli paikoin erittäin haastavaa. Keskijännitekojeiston katkaisijat tulee asettaa 0,2 sekunnin portaissa, jotta varmistetaan näiden kyky toimia selektiivisesti. Tätä lyhemmässä ajassa katkaisija ei ehdi toimia ennen kuin jo sitä seuraava katkaisija on havahtunut vikaan ja toiminut myös. Kun otetaan huomioon myös rengassyöttöjen mahdollinen käyttö, on ennen 20/0,4 kV muuntajia olevilla katkaisijoilla aika-arvona ainoastaan 0,4 sekuntia oikosulkuportaassa  $I >>$ . Tämä aiheuttaa sen, että pienjänniteverkossa joudutaan selektiivisyyden varmistamiseksi käyttämään lukituksia peräkkäisten katkaisijoiden välillä. [9; 21]

**Taulukko 4.** Sähköasemien suojaraleiden asetteluarvot.

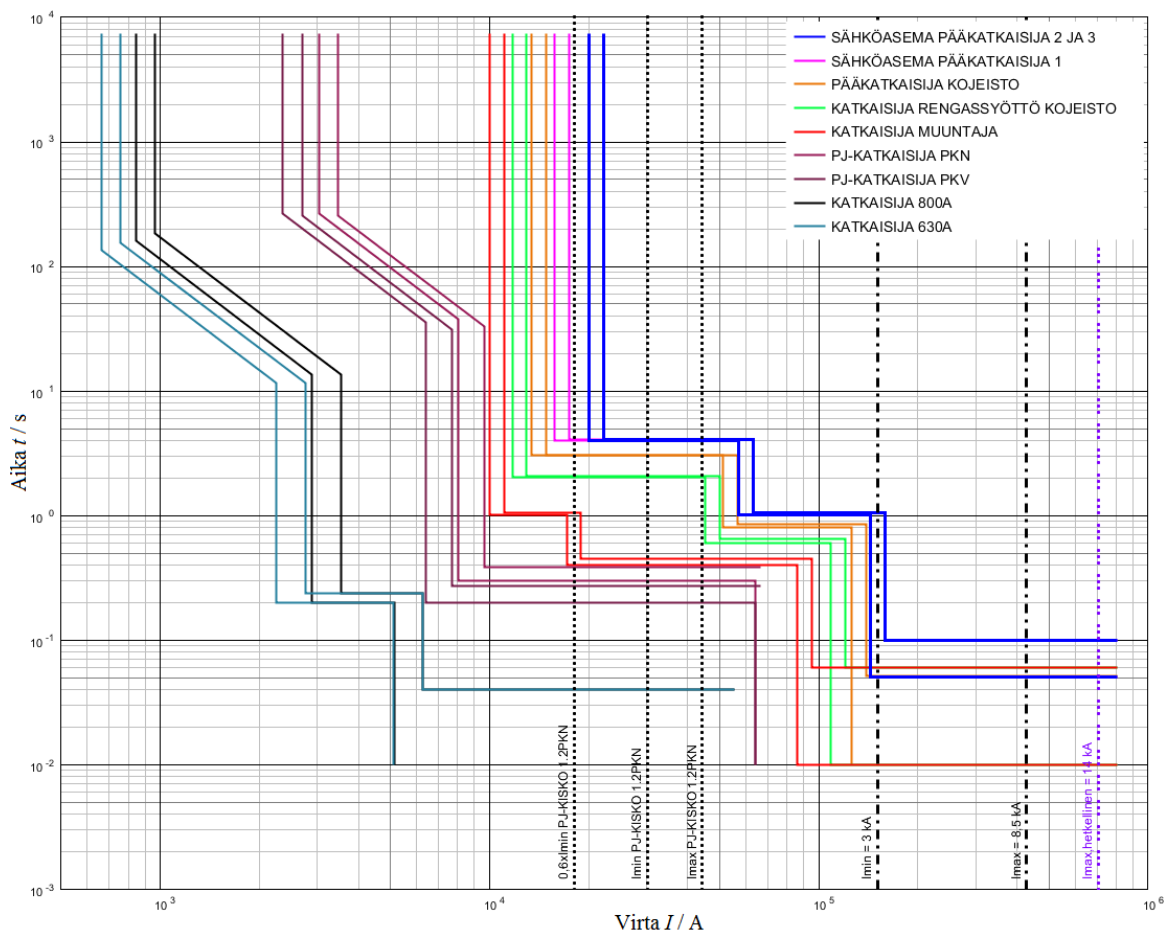
	Kojeisto 1		Kojeisto 2 ja 3	
	Virta-arvo / A	Aika-arvo / s	Virta-arvo / A	Aika-arvo / s
$I >$	330	4	420	4
$I >>$	1200	1	1200	1
$I >>>$	3000	0,05	3000	0,05

Myös keskijänniteverkossa joudutaan käyttämään lukituksia pikalaukaisuportaassa  $I >>>$ , koska sähköasemalla olevan suojaraleen asetteluista johtuen koko laitos tippuisi verkosta mahdollisen 3-vaiheisen oikosulun sattuessa. Sähköasemalla olevia suojauksia ei ollut mahdollista muuttaa arvoiltaan suuremmiksi, johtuen käytössä olevien sähköasemien päämuuntajien kapasiteetista ja nykyisistä jakeluverkon rakenneratkaisuista. Tästä johtuen laitoksen keskijännitekojeiston katkaisijat lukittiin aina sähköaseman lähtökatkaisijalle asti toisiinsa, jotta varmistettiin vika-alueen mahdollisimman pieni laajuus ja tarkka rajaus.

Lukituksien lisäksi katkaisijoissa otettiin käyttöön katkaisijavikasuojaus, joka on aseteltavissa päälle katkaisijoiden suojaraleisiin. Sen tarkoituksena on varmistaa jakeluketjussa seuraavana olevan katkaisijan toiminta siinä tilanteessa, että vikapaikkaa lähimpänä oleva katkaisija vikaantuisi eikä näin ollen pystyisi toimimaan. Tällöin esimerkiksi laitoksen keskijännitekojeistossa muuntajan yläpuolella olevan katkaisijan vikaantuessa rengassyötön katkaisija toimisi ja rajaisi muuntajan lähtöineen verkosta pois, muun laitoksen keskijännitekojeiston pysyessä edelleen verkossa kiinni.

## 5.1 Keskijännitekojeistojen pääkatkaisijat

Projektin kohteena olleen laitoksen keskijännitekojeistojen pääkatkaisijat aseteltiin asetteluarvoiltaan niin lähelle sähköasemien pääkatkaisijoiden asetteluarvoja kuin mahdollista. Näin varmistettiin mahdollisimman suuri säätövara alempana suojausketjussa oleville katkaisijoille. Koska minimioikosulkuvirrat keskijännitekojeistoilla olivat 3 kA, jonka jo sähköaseman syöttökatkaisijakin havaitsee, asetteluarvojen määrittäminen voitiin tehdä täysin sähköaseman syöttökatkaisijan asetteluarvojen ehdoilla.



**Kuva 16.** Keskijännitekojeiston suojalaitteiden selektiivisyyskäyrästöt



Kuvassa 16 on nähtävissä suojalaitteiden selektiivisyyskäyrästöt aina sähköaseman pääkatkaisijalta pienjänniteverkon pääkeskuksien lähtökatkaisijoille asti. Kuvassa sinisellä käyrällä on esitetty sähköaseman lähtökatkaisijan selektiivisyyskäyrä, jonka mukaiset asetteluarvot ovat nähtävissä taulukosta 4. Kuvassa on merkittynä oikealla puolella katkoviivoin keskijännitekojeistossa esiintyvät minimi-, maksimi, ja suurin hetkellinen oikosulkuvirta. Kuten kuvasta nähdään, osuu pienin oikosulkuvirran arvo suojalaitteiden päällekkäin meneville välittömän laukaisun -suojausalueille. Tästä syystä katkaisijoiden välillä täytyy käyttää lukituksia, jotta saavutetaan selektiivinen suojauksen toiminta. Perusasettelu 3I>>>-portaalle on katsottu selektiivisyyskäyrästä perusteella niin, että saavutetaan selektiivinen lopputulos. Alla olevasta taulukosta 5 on nähtävissä pääkatkaisijoiden asetteluarvot.

**Taulukko 5.** Pääkatkaisijoiden asetteluarvot

	<b>Aika <math>t/s</math></b>	<b>Virta <math>I/A</math></b>
3I >	3	282
3I >>	0,8	1074
3I >>>	0,01	2640

Ylikuormitussuojauksen asetteluarvo on katsottu liittymistä pienimmän syöttövirran tarjoavan vaihtoehdon mukaan, joka tässä tapauksessa oli kojeistolle 1 tuleva liittymä. Sen ylikuormitussuojauksen virta-arvo on 330 A ja aika-arvo 4 sekuntia, jolloin pääkatkaisijan 282 A virta-asettelulla ja 3 sekunnin aika-asettelulla saavutetaan selektiivinen ylikuormitussuojaus. Lisäksi tällä asettelulla varmistetaan, että katkaisijat eivät havahdu pienjänniteverkon pääkeskuksella esiintyvään suurimpaan mahdolliseen oikosulkuvirtaan, tämä on nähtävissä selektiivisyyskäyrästä kuvassa 16. Aika-asetteluissa tulee käyttää vähintään katkaisijoiden vaatimaa 0,2 sekunnin porrastusta, kuten todettu aiemmin tässä luvussa. Keskijännitekojeistoissa on liitettyä muuntajia seuraavanlaisesti:

- 2 kpl 2000 kVA muuntaja
- 2 kpl 1600 kVA muuntaja
- 3 kpl 1250 kVA muuntaja
- 2 kpl 1000 kVA muuntaja.

Näiden yhteen laskettu nimellinen teho on 12,95 MVA, josta saadaan tavallisella virranlaskentakaavalla 7 laskettua nimellisvirraksi 20 kV:n tasossa

$$I_N = \frac{S_N}{U_N \cdot \sqrt{3}} = \frac{12,95 \text{ MVA}}{20 \text{ kV} \cdot \sqrt{3}} = 373,83 \text{ A.} \quad (7)$$

Kuten taulukosta 4 on nähtävissä, ei kaikista liittymistä pystytä asetteluarvojen puolesta syöttämään näin isoa virtaa. Muuntajia ei kuitenkaan tulla käyttämään kaikkia yhtä aikaa

nimellisillä tehoillaan, jolloin asettelun mukainen 282 A:n virta riittää takaamaan laitoksen toiminnan normaaleissa käyttötilanteissa. Lisäksi on syytä ottaa huomioon yksittäisen muuntajan aiheuttaman kytkentävirtasysäyksen vaikutus suojauksessa. Kojeiston pääkatkaisija ei saa laueta verkkoon kytkeytyvän muuntajan takia. Kojeistoissa olevista muuntajista nimellisteholtaan suurin on 2000 kVA:n muuntaja. Muuntajien kytkentävirtasysäykset saattavat olla 8-12 -kertaisia muuntajan nimelliseen virtaan nähden, jolloin kaavaa 7 hyödyntäen saadaan kytkentävirtasysäyksen maksimiarvoksi määriteltyä n. 693 A. Tällöin oikosulkusuojauksen asetteluarvo 1074 A riittää huomioimaan tämän ja välttämään turhat muuntajien verkkoon kytkeytymisestä aiheutuvat suojauksien toimimiset.

## 5.2 Keskijännitekojeistojen muuntajakatkaisijat

Muuntajakatkaisijan tehtävänä on suojata muuntajaa ja sen syöttämää 400 V:n pääkeskusta. Katkaisijat aseteltiin niin, että ylikuormitussuojauksen virta-arvo  $3I >$  katsottiin selektiivisyyskäyrästä perusteella selektiiviseksi ylempien suojalaitteiden kanssa, pitäen arvo kuitenkin mahdollisimman suurena. Itse varsinainen muuntajan ylikuormitussuojaus päätettiin toteuttaa 400 V:n pääkeskuksessa olevalla pääkatkaisijalla, jolloin muuntajakatkaisija ei reagoi pienjänniteverkossa tapahtuviin kuormitusmuutoksiin niin herkästi, vaan pitää muuntajan aina verkkoon kytkettynä, mikäli varsinaista vikaa ei esiinny. [9; 22]

Oikosulkusuojauksen asetteluarvo  $3I >>$  määriteltiin pienjänniteverkon pääkeskuksissa esiintyvien oikosulkuvirtojen perusteella. Mikäli pääkeskuksessa esiintyy oikosulku ja pääkatkaisija on jostakin syystä vikaantunut, tulee muuntajakatkaisijan havaita vika ja katkaista se mahdollisimman nopeasti pois. Vika voi esiintyä myös muuntajan ja 400 V:n pääkeskuksen pääkatkaisijan välisessä kiskosillassa, jolloin pääkatkaisija ei havahdu kyseiseen vikaan. Asetteluarvoja määritettäessä tulee muistaa, että valokaari voi vaimentaa oikosulkuvirtaa jopa 40 %. Muuntajakatkaisijoiden asetteluarvot on nähtävissä alla olevasta taulukosta 6. [22]

**Taulukko 6.** Muuntajakatkaisijoiden asetteluarvot

	Aika t/s	Virta I/A
$3I >$	1	210
$3I >>$	0,4	360
$3I >>>$	0,01	1800

Pienjänniteverkon pääkeskuksissa oikosulkuvirtojen pienimmät arvot ovat laskelmien mukaan 30 kA, jolloin vaimentunut minimioikosulkuvirta on 0,6-kertainen eli 18 kA. Tämä arvo vastaa 20 kV:n puolelle redusoituna 360 A:n oikosulkuvirtaa. Aika-arvot on jälleen aseteltu 0,2 sekuntia lyhyemmiksi kuin ylemmän suojalaitteen vastaavat arvot, jotta katkaisijoiden aikaselektiivinen toimivuus voidaan taata. Hetkellinen oikosulkusuojaus  $3I >>>$  on aseteltu selektiivisyyskäyrästä perusteella selektiiviseksi yläpuolisten

suojalaitteiden kanssa. Kyseisen portaan aika-asettelulle ei jäänyt paljoa vaihtoehtoja, koska jo sähköaseman pääkatkaisija on aseteltu 0,05 sekuntiin. Tällöin kojeistossa olevien katkaisijoiden aika-asettelut määriteltiin käytännössä kaikkiin katkaisijoihin 0,01 sekuntiin, jolloin saavutettiin hieman porrastusta suojaukseen laitoksen ja sähköaseman välille. Tämä ei kuitenkaan riitä aikaselektiivisyyden varmistamiseen, joka johti tarpeeseen käyttää katkaisijoiden välisiä lukituksia, kuten edellä on kuvattu. Alempien portaiden suojalaitteilla esiintyvät oikosulkuvirrat ja selektiivisyyskäyrästöt täytyy ottaa huomioon myös, mutta asettelujen puolesta joudutaan joustamaan pienjänniteverkossa, koska keskijänniteverkossa tämä ei käytettävissä olevien asetteluvarojen puolesta ole mahdollista.

### 5.3 Maasulkusuojauksen asettelu

Keskijännitekojeiston katkaisijoissa on mahdollista asetella maasulkusuojaukselle virta- ja aika-arvot, joiden perusteella suojalaitteet toimivat maasulkuvirran ja -jännitteen havaittuaan. Maasulkusuojauksen asetteluun ei tämän projektin yhteydessä perehdytty syvällisemmin, koska se koski ainoastaan hyvin pientä osaa suojauksista ja sen asetteluille tuli myös ohjeistuksia sähköverkkoyhtiöltä. Alla olevasta taulukosta 7 näkyy sähköasemalla olevan pääkatkaisijan asetteluarvot ja vastaavasti keskijännitekojeistossa olevien katkaisijoiden asetteluarvot maasulkusuojauksen osalta. [21]

*Taulukko 7. Maasulkusuojauksen asetteluarvot*

	Aika $t/s$	Virta $I/A$	Jännite $U/V$
<b>Sähköaseman pääkatkaisija</b>			
$I_o >$	1	3	
$U_o >$			10 %
<b>Keskijännitekojeiston pääkatkaisija</b>			
$I_o >$	0,8	3	
$U_o >$			10 %
<b>Rengassyöttökatkaisija</b>			
$I_o >$	0,6	3	
$U_o >$			10 %
<b>Muuntajakatkaisija</b>			
$I_o >$	0,4	3	
$U_o >$			10 %

Virta-asettelu päädyttiin sähköverkkoyhtiön kanssa asettelemaan samaan arvoon kuin sähköasemalla olevalla katkaisijallakin. Aika-arvoa porrastamalla saavutetaan suojauksen selektiivisyys. Jänniteasettelu toimii lupaehtona, jolloin suojaus toimii, mikäli maasulkujännitteen arvo on vähintään 10% nimellisestä jännitteestä. Tämän lisäksi maasul-

kusuojaukseen otettiin käyttöön katkeileva maasulkusuoja, joka tunnistaa varsinkin yleisesti maakaapeliverkossa esiintyvät katkeilevat maasulut. Katkeileva maasulku on yleinen vika vanhoissa kaapeleissa, mutta kyseinen suojaus otettiin kuitenkin käyttöön sähköverkkoyhtiön suosituksesta uusia kaapeleita sisältävässä laitoksen keskijänniteverkossa. Tämän suojauksen tarkoituksena on toimia, mikäli havaitaan riittävä määrä tarpeeksi suuria katkeilevia maasulkuvirtoja tietyllä aikavälillä. Asetteluiksi suojareleeseen päädyttiin asettamaan 3 piikkiä 0,5 sekunnin aika-arvolla. [21]

## 6. PIENJÄNNITEVERKON SUOJAUKSET

Pienjänniteverkon suojaukset muodostivat projektin työmäärästä suurimman osan. Eri katkaisija ja suojalaite yhdistelmiä oli lukuisia ja lisäksi näiden yhteydessä oli käytössä useita eri kaapelikokoja sekä -tyyppejä. Lisäksi erikokoiset UPS-laitteistot aiheuttivat erilaisia tapauskohtaisia vaatimuksia suojalaitteiden yhdistelmille ja katkaisijoiden asetteluille. Koska jo keskijänniteverkossa oli hyvin vähän asetteluille ajan puolesta säätövaraa, olivat asettelut pienjänniteverkossa entisestäänkin tiukemmat tietyiltä osin jakelujärjestelmää. Tästä syystä myös pienjänniteverkossa jouduttiin turvautumaan lukituksien käyttämiseen varsinaisten pääkatkaisijoiden osalta.

### 6.1 Pääkeskuksien pääkatkaisijat

Pääkeskuksissa on pääkatkaisijoina ABB:n toimittamat ilmakatkaisijat, jotka hoitavat varsinaisen pienjänniteverkon sähkönjakelun suojauksen. Pääkeskuksilta sähkönsyöttö tapahtuu ABB:n kompaktikatkaisijoiden ja kytkinvarokkeiden kautta eteenpäin jakelukiskoilille, jakelu- ja nousukeskuksille sekä erinäisille kulutuskojeille. Pääkeskuksissa sijaitsevat pääkatkaisijat hoitavat myös muuntajien ylikuormitussuojauksen, kuten on mainittu edellä keskijänniteverkon suojauksia selvitettäessä.

Pääkatkaisijoiden suojaamia muuntajia on käytännössä neljää eri kokoa, joiden mukaisesti ylikuormitusportaan  $I >$  asettelut tulee tehdä. Pääkeskusten ja muuntajien välinen sekä pääkeskusten välinen keskinäinen sähkönjakelu tapahtuu kiskosiltojen kautta, jolloin suojausasetteluissa tulee ottaa huomioon myös näiden kuormituksien kesto. Muuntajien yhteyteen on asennettuna lisäksi jäähdytyspuhaltimet, jotka mahdollistavat muuntajien yhtäjaksoisen ylikuormittamisen 1,4-kertaisella muuntajan nimellisellä virralla tarpeen tullen. Puhaltimia ohjataan muuntajan lämpötilan perusteella, jota mitataan muuntajaan sijoitetuilla PT100 lämpötila-antureilla. Kun muuntajan lämpötila kasvaa kuormituksen seurauksena riittävän korkeaksi, jäähdytyspuhaltimet käynnistyvät ja pitävät muuntajan lämpötilan sallituissa rajoissa.

Pääkatkaisijan ylikuormitusportaan virran asetteluarvoksi 2000 kVA:n muuntajan yhteydessä saadaan määritettyä kaavan 7 mukaisesti

$$I_N = \frac{S_N}{U_N \cdot \sqrt{3}} = \frac{2000 \text{ kVA}}{0,4 \text{ kV} \cdot \sqrt{3}} = 2886,8 \text{ A.} \quad (7)$$

Kun huomioidaan vielä mahdollisuus kuormittaa muuntajaa 1,4-kertaisella kuormituksella nimelliseen nähden, saadaan arvoksi  $1,4 \cdot 2886,8 \text{ A} = 4041,5 \text{ A}$ . Tässä yhteydessä tulee kuitenkin muistaa, että sähkönjakelu tapahtuu kiskosiltojen kautta, joiden nimellinen kuormitusvirta on 3000 A. Näin ollen ylikuormitusportaan  $I >$  virta-asettelu täytyy asetella 3000 A:iin, jotta varmistetaan ylikuormitussuojauksen toimivuus jakeluverkon

kaikkien komponenttien osalta. Vastaavalla tavalla määrittäen saadaan virta-asettelun maksimiarvoksi 1600 kVA:n muuntajan tapauksessa samainen 3000 A, 1250 kVA:n muuntajan yhteydessä 2526 A ja 1000 kVA:n muuntajan kanssa 2020,7 A.

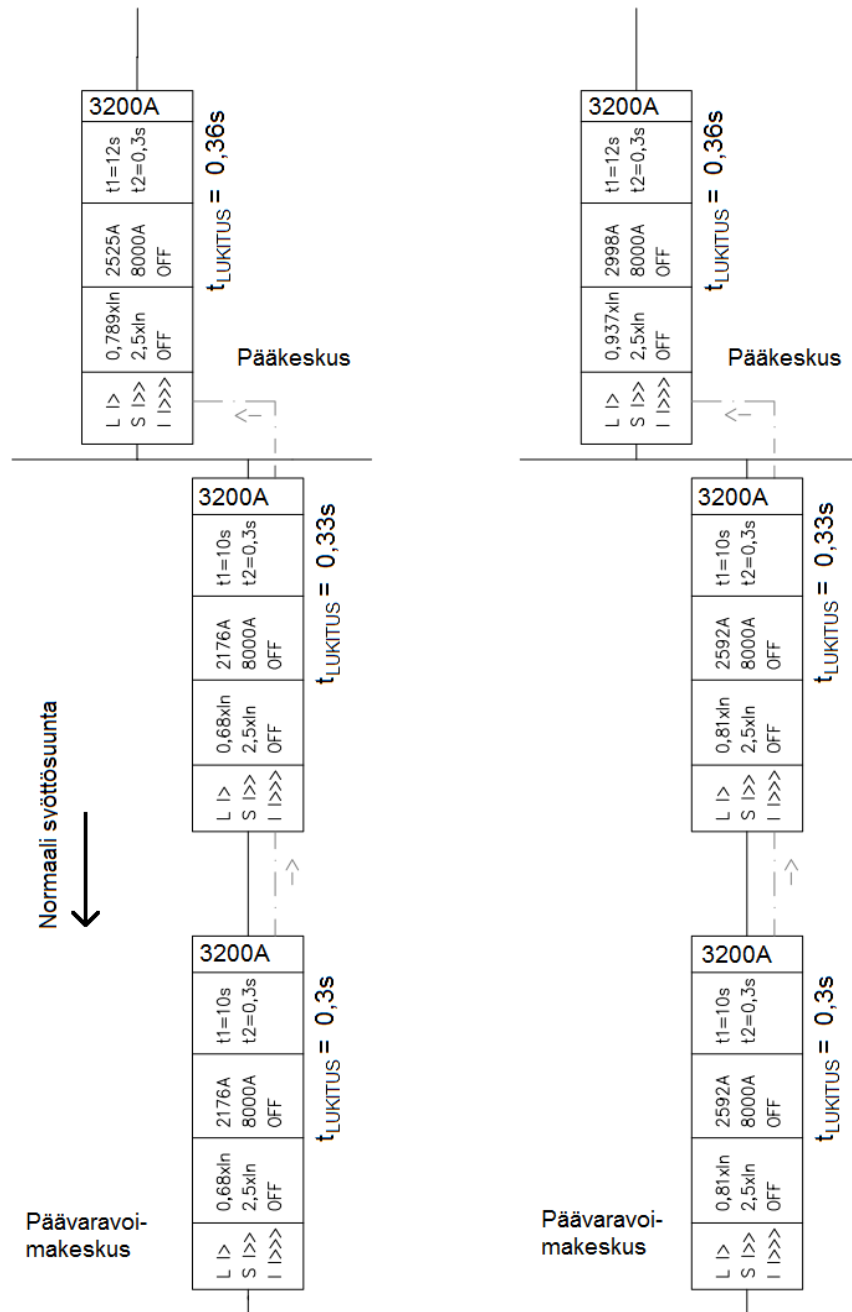
Ylikuormitussuojauksen asetteluun päädyttiin heti muuntajien jälkeisille katkaisijoille asettelemaan aika-arvoksi 12 sekuntia, joka jakeluketjussa alaspäin siirryttäessä pienenee 2 sekunnin portaissa alaspäin. Näin ollen pienin aika-arvo ylikuormitussuojaukselle on varavoimakeskuksen huoltosyötön pääkatkaisijalla oleva 8 sekuntia. Näillä aika-arvoilla saavutetaan riittävän nopea ylikuormitusvirran poiskytkentä, mutta siedetään kuitenkin hetken aikaa lievää ylikuormitusvirtaa.

Oikosulkusuojauksen asetteluarvot jouduttiin katsomaan osittain keskijänniteverkon suojalaitteiden asetteluarvojen mukaisesti, koska pienjänniteverkon suojalaitteiden asetteluarvot saattavat arvojen suuruuden puolesta vaikuttaa myös keskijänniteverkon suojalaitteiden toimintaan. Kuten kuvasta 16 nähdään, on muuntajan yläpuolinen keskijänniteverkon katkaisija ja pienjänniteverkon pääkeskuksen pääkatkaisija selektiivisyystaulukossa aivan peräkkäin niin virta- kuin aika-asetteluiden puolesta. Suurin mahdollinen oikosulkuportaan virta-asettelu on tällöin 8000 A, jotta suojauksen toiminta säilyy selektiivisenä. Aika-asettelulle katsottiin vastaavasti maksimiarvo, joka on 0,3 sekuntia. Tällöin keskijänniteverkon muuntajakatkaisijan aika-arvon ollessa 0,4 sekuntia, saavutetaan pienjänniteverkon kanssa täysin selektiivinen suojaus.

Kun pienjänniteverkon sähköjakelun pääketjussa tullaan alaspäin, on virta-arvoja tiputettava selektiivisyyskäyrästä perusteella niin, että saavutetaan selektiivinen suojauksen toiminta. Vastaavasti aika-asettelun arvot tulee asettaa vähintään 0,1 sekunnin portaissa, kuten on annettu ohjeeksi ABB:n manuaalissa. Pienin virta-arvo pääkatkaisijoissa on 6400 A ja vastaavasti aika-arvo 0,2 sekuntia. Nämä arvot on aseteltuna pääkeskusten välisten huoltosyöttöjen katkaisijoihin näiden selektiivisyyden varmistamiseksi varsinaisten pääkatkaisijoiden kanssa. Hyvin tiukoista keskijänniteverkon asetteluista johtuen, ei pääjakeluketjun pääkatkaisijoiden välisiä asetteluarvoja pystytty oikosulkusuojauksen osalta asettelemaan täysin selektiivisesti, joka johti tarpeeseen käyttää katkaisijoiden välisiä lukituksia. Pääkeskuksen ja päävaravoimakeskuksen väliset kaksi katkaisijaa aseteltiin samoihin asetteluarvoihin, koska näiden keskinäinen selektiivisyys ei ole ehdottoman tärkeää suojauksen toimivuuden kannalta. Toimipa kumpi tahansa näistä katkaisijoista, on Pääkeskusten ja päävaravoimakeskusten välisen suojauksen selektiivisyys varmistettu. [3]

Hetkellisen oikosulkusuojauksen  $I_{>>>}$  portaaseen ei ole aseteltavissa viivästystä suojauksen toiminta-aikaan, koska suojauksen on tarkoitus toimia välittömästi. Suojauksen asetteluiden virta-arvoa on kuitenkin mahdollista säätää, jolloin voidaan suurien oikosulkuvirtojen katkaisua nopeuttaa. Tässä kohteessa hetkellinen suojaus päädyttiin kuitenkin katkaisijoista asettelemaan pois päältä, jolloin oikosulun katkaisu tapahtuu aina viiväste-

tysti ja vältetään pääkatkaisijoiden selektiivisyyskäyrästön päällekkäisyys isompien pääkeskuksissa sijaitsevien kompaktikatkaisijoiden kanssa suuremmilla oikosulkuvirtojen arvoilla. Kuvassa 17 näkyy pääkatkaisijoihin määritellyt asetteluarvot. [3]



**Kuva 17.** Pääkatkaisijoiden asetteluarvot

Kuvassa katkoviivalla piirretty viiva esittää lukitussuojauksen lukitussignaalin kulkupe-  
 riaatetta, itse väylä käytännössä kulkee aiemmin käsitellyn GOOSE-järjestelmän raken-  
 teen mukaisesti suojalaitteiden välillä. Kuten aiemmin todettu, on pääkeskuksen ja pää-  
 varavoiakeskuksen väliset katkaisijat aseteltu samoihin asetteluarvoihin. Katkaisijoista

ylempi sijaitsee pääkeskuksessa, kun taas alempi sijaitsee päävaravoimakeskuksessa. Vasemmalla esitetty haara kuvaa 1250 kVA:n muuntajan syöttämää jakeluosaa ja oikeanpuoleinen haara 2000 tai 1600 kVA:n muuntajan syöttämää haaraa. Jälkimmäisille on samat asetteluarvot, koska muuntajien ylikuormitus mahdollistaa kiskosillan virrankestoa suuremmat asetteluarvot, jolloin siis asetteluarvot on kiskosillan arvojen mukaisesti aseteltu.

Peräkkäiset katkaisijat saadaan lukitussuojauksen arvoja säätämällä selektiiviseksi, jolloin siis katkaisijoista alimpaan asetellaan aikaportaan arvoksi viivästykseltään pienempi arvo kuin ylempään katkaisijaan. Lukitussuojausta käytettäessä voidaan kuitenkin säätää ainoastaan oikosulkuportaan S aika-arvoa  $t_2$ , joka aiheuttaa omat haasteensa asetteluihin. Perusasetteluita käytetään, mikäli vika tapahtuu suoraan katkaisijan edessä, jolloin siis lukitussignaalia ei katkaisijalle tule edeltäviltä katkaisijoilta. Vastaavasti perusasettelut ovat käytössä myös, mikäli lukitusväylässä on ongelmia tai katkaisijoiden apujännite on katkennut. Tällä varmistetaan vian katkaisu verkosta pois, vaikka selektiivisyysvaade ei muuten täysin täytyisikään. Jos vika tapahtuu kauempana ja katkaisija saa edeltäviltä katkaisijoilta lukitussignaalin, käytetään lukitukselle aseteltua viivästettyä aika-arvoa  $t_{LUKITUS}$ . Muut asetteluarvot ovat edelleen perusasetteluiden mukaisia, jolloin siis lukitussuojauksella saadaan säädettyä oikosulkusuojauksen keskinäisten aika-arvojen porrastusta tarkemmaksi ja näin saavutettua selektiivisyyttä. [5]

Kuvaan 17 on merkittynä jokaisen katkaisijan viereen lukituksen aika-asettelun arvo  $t_{LUKITUS}$ , jolla kuvataan siis lukitustoiminnon alaisena toteutetun suojauksen aika-asettelun viivästysarvoa. Tämä arvo voi kuitenkin lukitussuojauksen mahdollistaman nopeuden takia olla huomattavasti pienempi kuin ilman lukituksia. Tämä johtuu siitä, että ilman lukitussuojausta katkaisijoiden viivästyksessä tulee olla riittävästi pelivaraa suojausketjussa lähempänä vikapaikkaa olevien suojalaitteiden toiminnan varmistamiseksi. Kun verkossa esiintyy vika, näkevät lähellä vikapaikkaa olevat kaikki katkaisijat tämän, mutta kauimmaisilla näistä tulee olla aseteltuna sen verran viivästystä, että vikapaikkaa lähinnä oleva katkaisija ehtii havahtua ja katkaista vian pois, ennen kuin kauimmaisat katkaisijat alkavat toimimaan. Lukitussuojauksen kanssa lukitussignaali lähtee vikapaikkaa lähinnä olevalta katkaisijalta kaikille kauimmaisillekin katkaisijoille, jolloin nämä tietävät saman tien toisen katkaisijan hoitavan vian katkaisun. Täten aika-asettelun viivästys voi olla lyhyempi, koska katkaisijat viestivät suoraan keskenään tulevista toimistaan. [5]

Oikosulkuportaan S lukitussuojauksen viivästyksen portaiden väliseksi arvoksi päädyttiin asettelemaan 30 millisekuntia, joka riittää hyvin varmistamaan katkaisijoiden keskinäisen selektiivisyyden. Suojauksesta ei tässä yhteydessä tarvinnut tehdä suuntaavaa, koska virta kulkee käytännössä aina muuntajalta alaspäin pääkeskuksille. Mikäli varavoimasyöttö on käytössä, eivät nämä katkaisijat ole kytkettyinä kiinni. Muuntajan alapuolisella katkaisijalla viivästyksen aika-arvo nousee jo 0,36 sekuntiin, joka on hyvin lähellä muuntajan yläpuolisen katkaisijan 0,4 sekuntia. Tässä tulee kuitenkin muistaa, että mikäli vika ta-



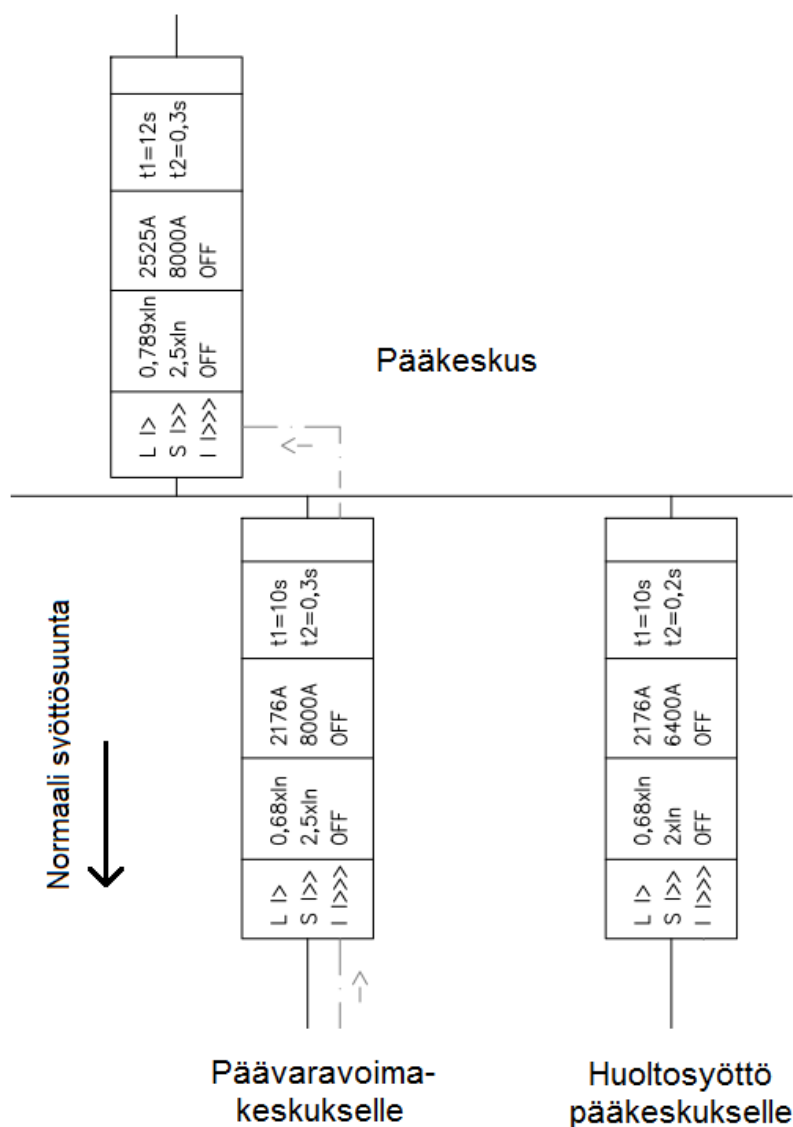
pahtuu suoraan muuntajan alapuolisen katkaisijan suojausalueella, on käytössä perusasettelun mukainen aika-arvo 0,3 sekuntia, joka on selektiivinen suojauksessa yläpuolisiin suojalaitteisiin verrattuna. Mikäli vikapaikka on kauempana ja suojaus toimii vasta muuntajan alapuolisen katkaisijan toteuttamana, on alemmissa katkaisijoissa esiintynyt jokin näiden toimintaan vaikuttava vika, jolloin käytännössä muuntajan yläpuolisen katkaisijan laukeamisella ei ole kovin suurta merkitystä käyttövarmuuden tai selektiivisyyden kannalta. Tämä siitä syystä, että tällöin tulee joka tapauksessa muuntajan alapuolisen sähköjakelunjärjestelmän suojauksien toimivuus tutkia ennen kuin kyseinen verkon osa voidaan ottaa uudelleen käyttöön muuntajan syöttämänä ja varmistaa etenkin varavoimapäkeskuksen suojalaitteiden toiminta, jotta tämä keskus voidaan liittää varavoiman perään.

## 6.2 Pääkeskuksien huoltosyötöt

Pääkeskuksien väliset huoltosyötöt mahdollistavat sähkönsyötön poikkeustilanteissa pääkeskusten välillä, jos esimerkiksi joku muuntajista tai varavoimakoneista vikaantuu tai on huollettavana. Useamman huoltosyötön samanaikainen käyttö on kuitenkin erittäin harvinainen tilanne, koska se vaatisi käytännössä yhden muuntamo-osan muuntajan sekä varavoiman tehojakopuolen samanaikaisen vikaantumisen ja näiden välisen verkonosan säilymisen toimintakunnossa, jotta huoltosyöttöjä tämän verkonosan pääkeskuksille voitaisiin käyttää. Tyypillisin tilanne onkin normipuolen pääkeskuksen syöttäminen huoltosyötön kautta, mikäli muuntaja on esimerkiksi huollettavana.

Huoltosyöttöjen katkaisijat päädyttiin asettelemaan asetteluarvoiltaan hieman alemmaksi pääkatkaisijoihin nähden, jolloin näiden välille ei tarvita lukituksia. Huoltosyötöt kuitenkin varustettiin kummastakin päästään katkaisijoilla ja näiden asetteluarvot päädyttiin asettelemaan samoihin arvoihin. Näiden välille on mahdollista toteuttaa GOOSE-viestein lukitussuojaus kuten pääkatkaisijoihinkin, koska katkaisijoista otetaan joka tapauksessa käyttötietoja, energiatietoja ja hälytyksiä Ethernet-väylän kautta. Tämä mahdollistaa siis varautumisen jatkossa lukituksien konfiguroimiseen katkaisijoiden välille, mutta käytännössä näiden keskinäisellä selektiivisyydellä ei ole merkitystä. Selektiivisyyden suhteen ylempiin suojalaitteisiin verrattuna ja suojauksen toimivuuden kannalta ei ole merkitystä kummasta päästä kiskosiltaa katkaisija vikatapauksissa toimii.

Kuvassa 18 on esitettyä yhden huoltosyötön asetteluarvot, joilla on toteutettu riittävä porrastus pääkatkaisijaan nähden selektiivisyyden saavuttamiseksi. Myös muut huoltosyötöt on aseteltu arvojen puolesta samalla periaatteella selektiivisiksi pääkatkaisijoihin nähden. Virta-arvot on pyritty pitämään mahdollisimman isoina, jotta voitaisiin taata riittävä määrä tehoa huoltosyötön kautta syötettävän keskuksen kulutuskohteille. Tarpeen tullen näissä pääkeskuksissa joudutaan kuitenkin rajaamaan suuritehoisimmat lähdöt ja/tai kojeet pois käytöstä, kunnes voidaan palata normaaliin käyttötilanteeseen.

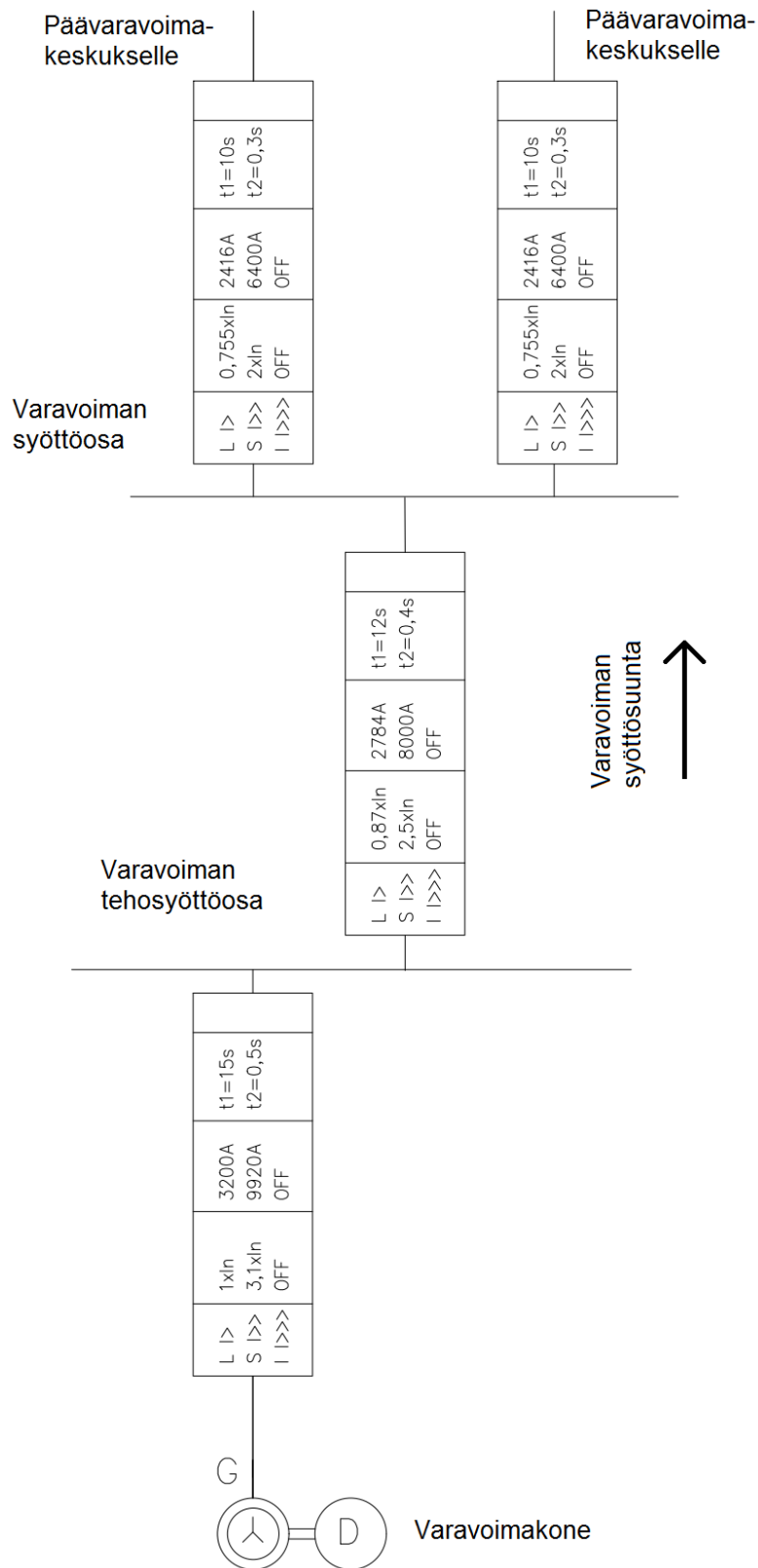


*Kuva 18. Erään huoltosyötön asetteluarvot*

### 6.3 Varavoiman tehosityöttöosa

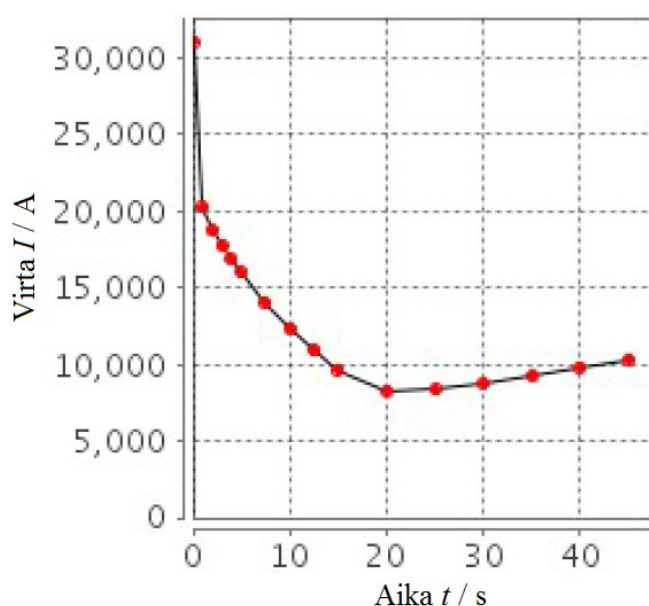
Varavoiman tehosityöttöosa on hyvin tärkeä osa sähkönjakelujärjestelmää varavoiman jakelun kannalta. Sen tehtävänä on kerätä varavoimageneraattoreiden tuottama sähköenergia ja jakaa se edelleen varavoimapääkeskuksille. Tehosityöttöosa voi toimia joko kolmessa osassa tai yhtenä kokonaisuutena, tilanteen vaatiman käyttötavan mukaan. Normaalisti tehosityöttöosa on jaettuna kolmeen osaan, jolloin kullekin muuntamolle on oma varavoimageneraattorinsa. Mikäli jokin generaattoreista on huollossa tai tarvitaan muilta varavoimakoneilta lisätehoa tietyille muuntamolle enemmän kuin yksi generaattori pystyy tuottamaan, voidaan tehosityöttöosan kiskokatkaisijat ajaa kiinni ja jakaa näin kolmen varavoimakoneen tuottama teho tasan koko tehosityöttöosalle.

Varavoiman tehosyöttöosa jakaa varavoimakoneiden tuottaman sähkön kunkin muuntamon varavoiman syöttöosan pääkeskukselle, josta sähkönjakelu tapahtuu varsinaisille päävaravoimakeskuksille, kuten nähdään alla olevasta kuvasta 19.



**Kuva 19.** Varavoiman sähkönjakelu

Kuten kuvasta 19 nähdään, katkaisijoiden asetteluarvot on porrastettu samalla tavalla kuin pääkeskusten pääkatkaisijoissakin. Tässä tapauksessa ei kuitenkaan sähköaseman suojausasetteluilla, ja sitä myöten keskijännitekojeisten suojausasetteluilla, ole merkitystä käytettävissä oleviin aika- ja virta-asetteluihin. Ainoana rajoittavana tekijänä on generaattorin kyky tuottaa tietty nimellisteho ja tietty oikosulkuvirta määritellyn ajan verran. Täten varavoimapuolen pääjakelureitti saatiin toteutettua selektiivisesti ilman, että täytyisi käyttää lukituksia katkaisijoiden välillä. Alla olevassa kuvassa 20 on esitettyä generaattorin tuottaman oikosulkuvirran kuvaaja, joka kuvaa yhden varavoimakoneen tuottamaa oikosulkuvirtaa ajan funktiona.



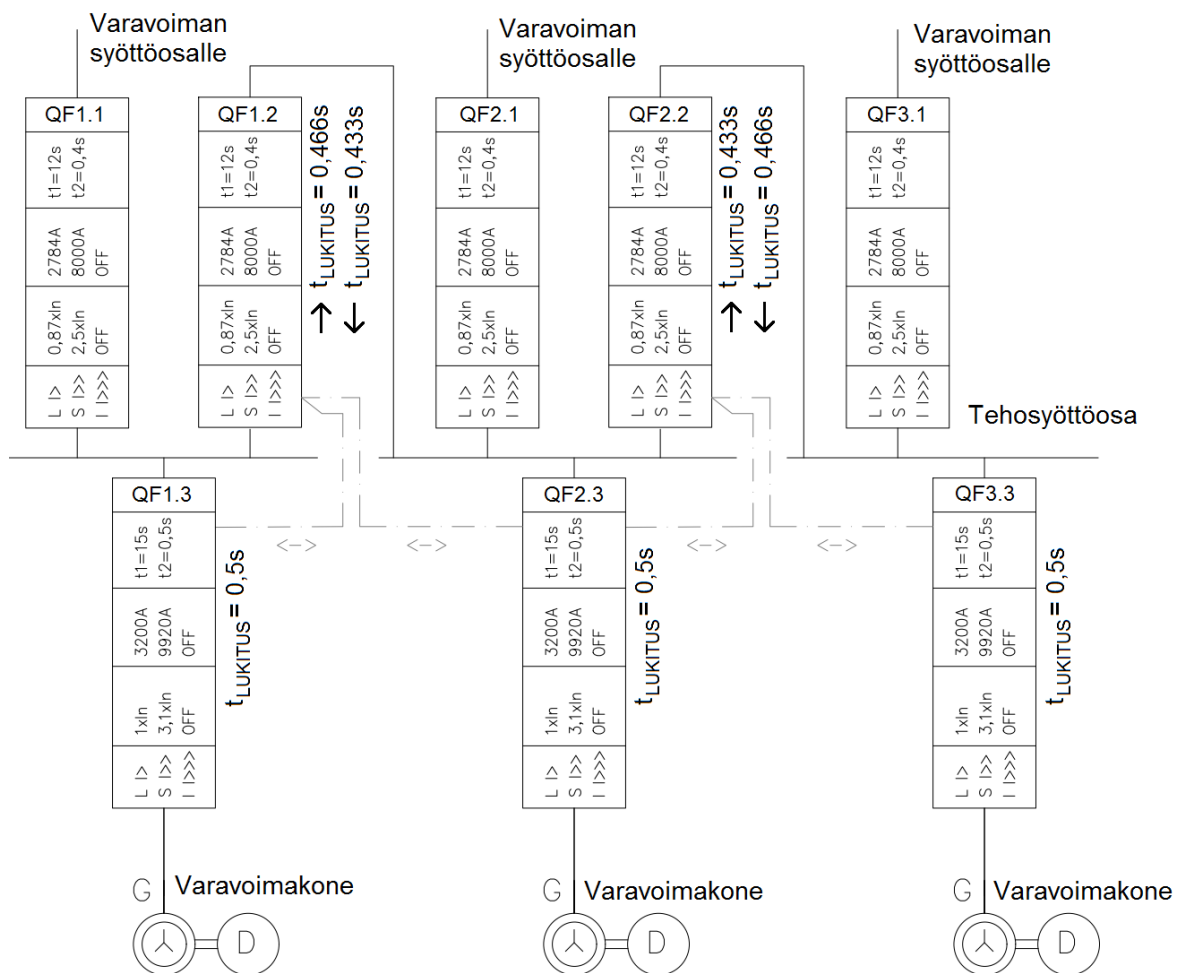
**Kuva 20.** Generaattorin tuottama oikosulkuvirta

Kuten kuvasta nähdään, on hetkellinen suurin mahdollinen oikosulkuvirta noin 31 kA. Arvoista merkittävin suojausasetteluiden kannalta on kuitenkin tietyn ajan kuluttua tuotettu oikosulkuvirta. Aika ja virta-asettelun puolesta vaaditaan vähintään oikosulkuportaan asetteluarvoihin määritetty 9,92 kA:n oikosulkuvirta 0,5 sekunnin kohdalla. Kuten kuvaajasta nähdään, pystyy generaattori tuottamaan vaaditun virran aina noin 15 sekuntiin asti, jolloin suojaus on jo toiminut. Siitäkin huolimatta, että jouduttaisiin esimerkiksi katkaisijavian takia turvautumaan suojausketjussa vasta kahden seuraavan suojalaitteen toimintaan, oikosulkuvirran tuottokyky riittää suhteessa määritettyihin asetteluarvoihin.

Ylikuormitusportaan arvot on aseteltu virran puolesta niin korkeiksi kuin mahdollista, silti selektiivinen toiminta säilyttäen. Näin pystytään käyttämään varavoimakoneen tuottama teho kokonaisuudessaan tarvittaessa hyödyksi ja varmistamaan myös varavoimapuolen huoltosyöttöjä käytettäessä tehonsyötön riittävyys. Mikäli tehosiöttöosa toimii yhtenä kokonaisuutena, voitaisiin kiskosiltojen puolesta käyttää suurempiakin virranarvoja asetteluarvoissa, mutta tällöin tulisi generaattorin kiskosillan ja sen katkaisijan virran kestoa suurentaa, jotta saadaan asettelut toimimaan selektiivisesti. Hetkellisen oikosulku-

portaan asettelut päädyttiin asettamaan pois päältä samaan tapaan kuin pääkeskusten pääkatkaisijoillakin. Näin saadaan vältettyä useamman peräkkäisen suojalaitteen selektiivisyyskäyrän päällekkäisyys hetkellisen oikosulkusuojauksen osalta.

Varsinaisen tehosityöttöosan katkaisijoiden välillä jouduttiin käyttämään lukituksia, jotta voitiin taata suojauksen selektiivisyys kaikissa käyttötilanteissa. Kuten aiemmin todettu, tehosityttöosa on jaettavissa kiskokatkaisijoilla niin, että se voi toimia yhtenä kokonaisuutena tai kolmessa muuntamokohtaisessa osassa. Tästä syystä virran suunnat tehosityttöosan kiskostossa vaihtelevat täysin käyttötilanteen mukaisesti, jolloin kiskokatkaisijat tulee kuitenkin asetteluarvojen puolesta pitää mahdollisimman lähellä varavoimakoneiden kiskosiltojen katkaisijoiden vastaavia arvoja. Näin varmistetaan tehojen ja vikavirtojen riittävyys kaikissa tilanteissa, syötettiinpä sitten kyseistä varavoimakoneelle määritettyä muuntamo-osuutta tai kaikkia kolmea näistä. Alla olevassa kuvassa 21 on nähtävissä tehosityttöosan rakenne asetteluineen.



**Kuva 21.** Varavoiman tehosityttöosan asetteluarvot

Asetteluarvoissa on edelleen pidetty hyväksi havaittu sama periaate kuin pääkeskusten pääkatkaisijoidenkin asetteluissakin. Varavoimakoneiden kiskosiltojen ja varavoiman syöttöosan sekä tehosityttöosan kiskokatkaisijoiden väliset perusasettelut on määritelty

selektiivisiksi jokaisessa käyttötilanteessa. Tällöin siis esimerkiksi vian ilmaantuessa väylässä tai katkaisijoiden apujännitteen pettäessä saavutetaan suojauksen selektiivinen toiminta ja varavoimakoneiden kiskosiltojen katkaisijat pysyvät mahdollisimman pitkään päällä. Jos alapuolinen katkaisija jostakin syystä vikaantuu, toimii tällöin kiskosillassa oleva katkaisija, mutta muuten periaatteena on pitää varavoimakoneet tehosyöttöosaan liitettynä ja käytössä mahdollisimman pitkään.

Tehosyöttöosan osioiden väliset kiskokatkaisijat tulee kuitenkin lukitussuojata, jotta tie-tyissä käyttötilanteissa saavutettaisiin selektiivinen suojauksen toiminta. Kuvassa 21 esitettyssä tilanteessa katkoviivat esittävät katkaisijoiden välisiä lukitussignaaleja. Kuvassa esitettyä ratkaisua voisi entisestään parantaa liittämällä myös varavoiman syöttöosaa syöttävät katkaisijat lukitussuojauksen piiriin, mutta tähän ei tässä vaiheessa saanut mahdollisuutta johtuen monimutkaisemmasta lukituksien konfiguroinnista ja tätä myöten kustannuksellisista syistä. Olemassa olevan Ethernet-väylän kautta tämä on periaatteessa vielä jälkikäteen mahdollista, mikäli koestusvaiheessa tähän koetaan välttämätön tarve, mutta ensisijaisesti lukitussuojauksen piiriin päädyttiin asettamaan tässä vaiheessa kiskokatkaisijat ja varavoimakoneiden kiskosiltojen katkaisijat.

Kuten kuvasta 21 nähdään, lukitussuojauksen aika-asettelu  $t_{LUKITUS}$  on aseteltu toimimaan 50 millisekunnin välein. Tässä tapauksessa joudutaan kuitenkin soveltamaan myös suunnattua lukitussuojausta, jotta saavutetaan haluttu ja oikeanlainen suojauksen toiminta. Mikäli vika esiintyy tehosyöttöosalla esimerkiksi kuvan 21 vasemmanpuoleisimmassa osassa, joko kiskossa tai syöttöosaa syöttävässä kiskosillassa, havaitsevat vian niin varavoimakoneen kiskosillan katkaisija QF1.3 kuin tehosyöttöosan kiskokatkaisijakin QF1.2. Tämä siis siinä tilanteessa, että tehosyöttöosa toimii yhtenä kokonaisuutena. Tällöin tehosyöttöosan kiskokatkaisija QF1.2 ei saa lukita varavoimakoneen kiskosillan katkaisijaa QF1.3, vaan näiden tulee kummankin toimia mahdollisimman pian vian katkaistakseen ja mahdollistaakseen muun tehonsyöttöosan normaalin toiminnan. Tästä syystä asetteluiden konfiguroinnissa tulee ottaa huomioon virran syöttösuunnat kussakin tilanteessa ja määrittää näin suojaukset toimimaan oikealla tavalla. Mikäli tehonsyöttöosa toimii kolmessa erillisessä osassa, ei lukituksia tarvita, vaan suojaus toimii perusasetteluiden perusteella oikein, koska tällöin tehonsyöttöosan kiskokatkaisijat QF1.2 ja QF2.2 eivät ole käytössä. Alla olevassa taulukossa 8 on esitettyä katkaisijoiden väliset suunnatut lukitukset, joiden mukaan suojaus saadaan toimimaan oikealla tavalla.

**Taulukko 8.** Lukitussuojauksen suuntauksien konfiguroinnit

Katkaisija	Suunta	QF1.2		QF1.3		QF2.2		QF2.3		QF3.3	
		Eteen	Taakse	Eteen	Taakse	Eteen	Taakse	Eteen	Taakse	Eteen	Taakse
QF1.2	Eteen	O		X							
	Taakse		O				X	X		X	
QF2.2	Eteen	X		X		O		X			
	Taakse						O			X	

Taulukossa näkyy vasemmalla katkaisija, joka havaitsee vikavirran ja tämän kulkusuunnan, tämä havainto on merkattu taulukkoon symbolilla O. Tämän mukaisesti vikavirran havainnut katkaisija lähettää lukitussignaalin muiden katkaisijoiden suunnatuille suojuuksille, jolloin nämä lukittuvat määrättyyn suuntaan kulkevan vikavirran mukaisesti, tämä on merkattu taulukkoon symbolilla X. Eli jos esimerkiksi katkaisija QF2.2 havaitsee vikavirran kulkevan eteenpäin, lukitaan katkaisijat QF1.2, QF1.3 ja QF2.3, jotta ne eivät toimi vikavirran kulkiessa niistä eteenpäin. Kuvassa 21 vikavirran katsotaan kulkevan eteenpäin, mikäli se kulkee katkaisijaa kuvassa katsoessa ylöspäin, vastaavasti vikavirran katsotaan kulkevan taaksepäin, jos kuvassa vikavirta kulkee katkaisijaa katsoessa alaspäin.

Edellä mainituilla keinoilla saadaan varavoiman tehosyöttöosa toimimaan selektiivisesti kaikissa eri käyttötilanteissa. Kuten aiemmin mainittu, pienen puutteen selektiivisyyteen aiheuttaa varavoiman syöttöosan katkaisijoiden QF1.1, QF1.2 ja QF1.3 lukituksien puutteet, mutta käytännössä tämä ei vaikuta suojuuksien toimintaan haittaavasti eikä selektiivisyyteenkään merkittävästi. Käytännössä vain, jos vika sattuu varavoiman syöttöosaa syöttävässä kiskossa ja/tai kaapeleissa, on mahdollisuus, että tehosyöttöosan kiskokatkaisija QF1.2 tai QF2.2 toimiikin ennen syöttöosan katkaisijaa. Tällöin kuitenkin vikapaikka joka tapauksessa erotetaan sähkönjakelusta ja muu osa tehosyöttöosasta jää edelleen toimimaan normaalisti.

## 6.4 Jakelukiskojen ja ryhmäkeskusten syötöt

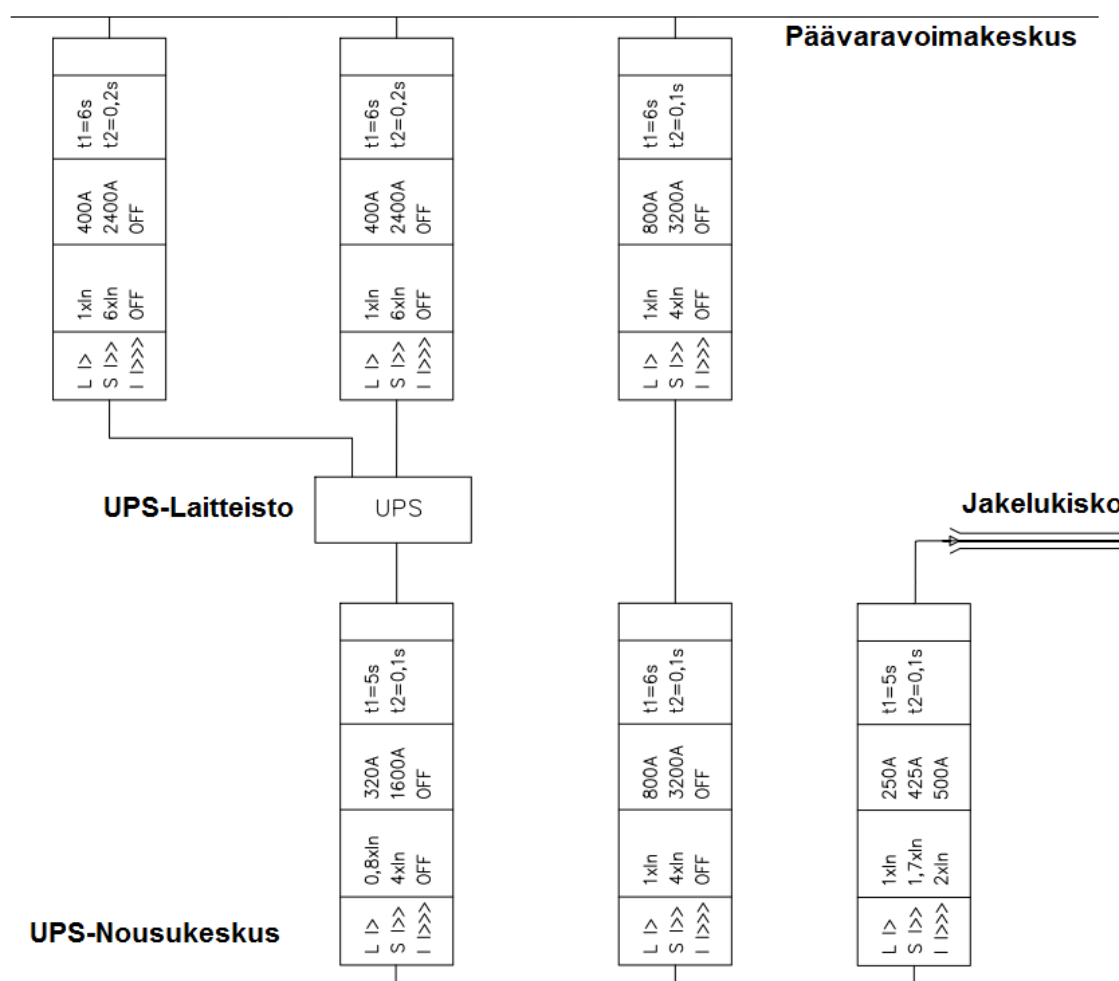
Pääjakelun suojuuksen selektiivisyyden varmistamisen ohella projektin suuritöisin osuus oli pienjänniteverkon jakelukiskojen ja ryhmäkeskusten suojuuksien selektiivisen toiminnan ja asetteluarvojen määrittäminen sekä lukuisten eri suojalaiteyhdistelmien yhteistoiminnan varmistaminen. Oman haasteensa toi myös pääkeskusten lähtökatkaisijoiden ja jakelukiskojen virranottimien laitetoimittajien eriävyys. Lähtökatkaisijat ovat ABB:n toimittamia, kun taas virranottimet ovat pääsääntöisesti Siemensin tuotteita. Näiden toimintaa ei työtä tehdessä pystynyt täysin varmasti ohjelmistojen avulla toteamaan, koska kummankaan valmistajan tarjoamat laskentaohjelmistot eivät tue kilpailevien yritysten tuotteita. Tästä syystä jouduttiin tietyille katkaisijayhdistelmille teettämään erilliset laboratoriotestit, joissa selvitettiin kunkin katkaisijayhdistelmän yhteensopivuus ja sille mahdollisesti muodostuvat rajoitukset.

Kun otetaan huomioon kaikki keskuksien ja laitteiden, sekä näistä osan välillä olevat huoltosyötöt, tulee erilaisia suojattavia kohteita pitkälti yli 1000 kappaletta. Näistä osa on käytännössä suoraan toistensa kanssa yhteneviä, josta syystä myös suojuuksien selektiivisyyksien toteutuksissa voitiin käyttää jonkin verran yhteneviä ratkaisuja. Oman haasteena projektin kuluessa loi komponentteihin ja kojeistoihin tulleet muutokset, jonka takia monesti jouduttiin myös suojuuksien asetteluarvoja ja suojalaiteyhdistelmien toimivuutta tarkistamaan sekä tarkentamaan uudelleen. Koska erilaisia vaihtoehtoja ja ratkaisuja

muodostui lopulta lukematon määrä, on tässä työssä päädytty esittämään pari hankalinta ja mielenkiintoisinta tapausta.

### 6.4.1 UPS-nousukeskuksien selektiivisyys

UPS-nousukeskuksien tehtävänä on syöttää niihin kumpaankin liitettyjä neljää jakelukiskoa sekä yksittäisiä ryhmäkeskuksia. UPS-nousukeskuksissa on yhteensä kolme UPS-laitteistoa, mutta tilanteen mukaan näistä vain yksi saattaa olla toiminnassa tai tarpeen vaatiessa kaikki kolme yhtä aikaa. Näiden lisäksi pääkeskukselta tulee kiskosilta UPS-nousukeskukselle, jonka avulla on mahdollista ohittaa kaikkia UPS-laitteistot tarpeen tullen. Selektiivisyyden kannalta oman haasteensa loi peräkkäisten suojalaitteiden suuri määrä, pääkatkaisija mukaan lukien suojalaitteita on yhteensä 6 kappaletta, joista parhaimmillaan 5 on peräkkäin yhtä aikaa toiminnassa. Tarkoituksena oli toteuttaa suojaus niin, että ei tarvitse käyttää lukitusuojausta katkaisijoiden välillä. Alla olevassa kuvassa 22 on esitettyä yhden UPS-laitteiston syöttöhaaran ja ohitusyötön määritellyt asettelu-arvot ja rakenne.

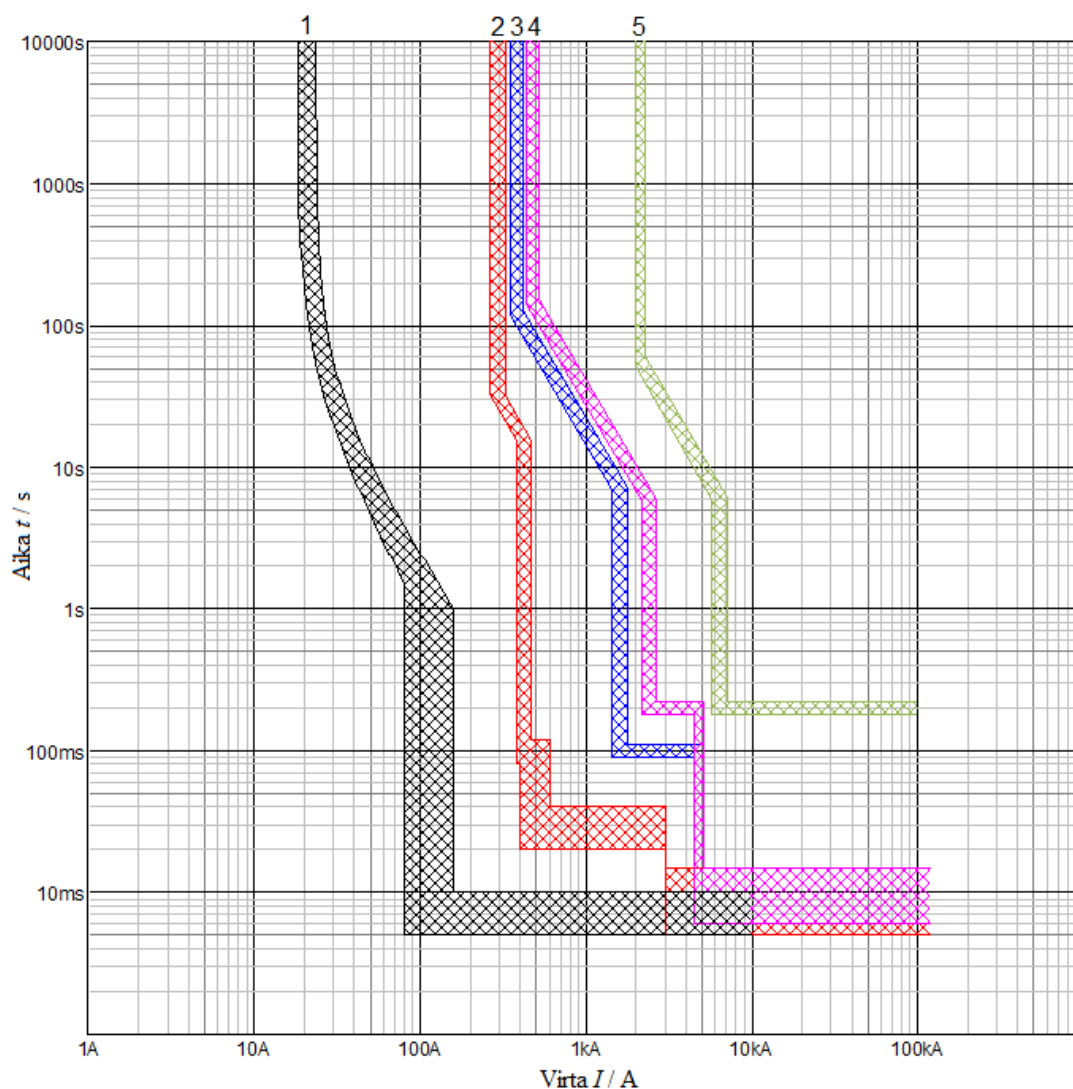


Kuva 22. UPS-nousukeskuksen asettelu-arvot



Kuten kuvasta nähdään, tulee UPS-laitteistolle kaksi syöttöä, joista kummatkin ovat 400 A:n katkaisijoita. Näistä toinen syöttää UPS-laitteiston normaalin syöttötilanteen tuloa ja toinen UPS:n oman ohitusyötön tuloa. UPS-laitteiston jälkeen on vielä yksi 400 A:n katkaisija, joka suojaa itse UPS-nousukeskusta. Edellä mainittujen lisäksi on käytössä myös kaksi peräkkäistä 800 A:n katkaisijaa, jotka hoitavat pääkeskuksesta kiskosillan kautta tapahtuvan ohitusyötön suojauksen. UPS-nousukeskuksesta syötetään jakelukiskoja 250 A:n lähtökatkaisijoiden välityksellä, suojalaitteina jakelukiskoissa olevissa keskuksissa/laitteissa on maksimissaan C16A johdonsuojakatkaisija.

Suojausasetteluita tehdessä tulee ottaa huomioon UPS-laitteistojen syöttämän oikosulkuvirran arvo, joka tässä tapauksessa on 670 A. Tällöin 250 A:n katkaisijan oikosulkusuojauksen virta-arvo tulee olla korkeintaan 0,7-kertainen oikosulkuarvoon verrattuna, jotta otetaan huomioon mahdollinen vikavirran vaimeneminen ja suojalaitteiden toimintatoleranssit. Alla olevassa kuvassa 23 esitettyssä selektiivisyyskäyrästä on nähtävissä tarkemmin kuvassa 22 esitettyjen asetteluarvojen keskinäinen toiminta. [9]



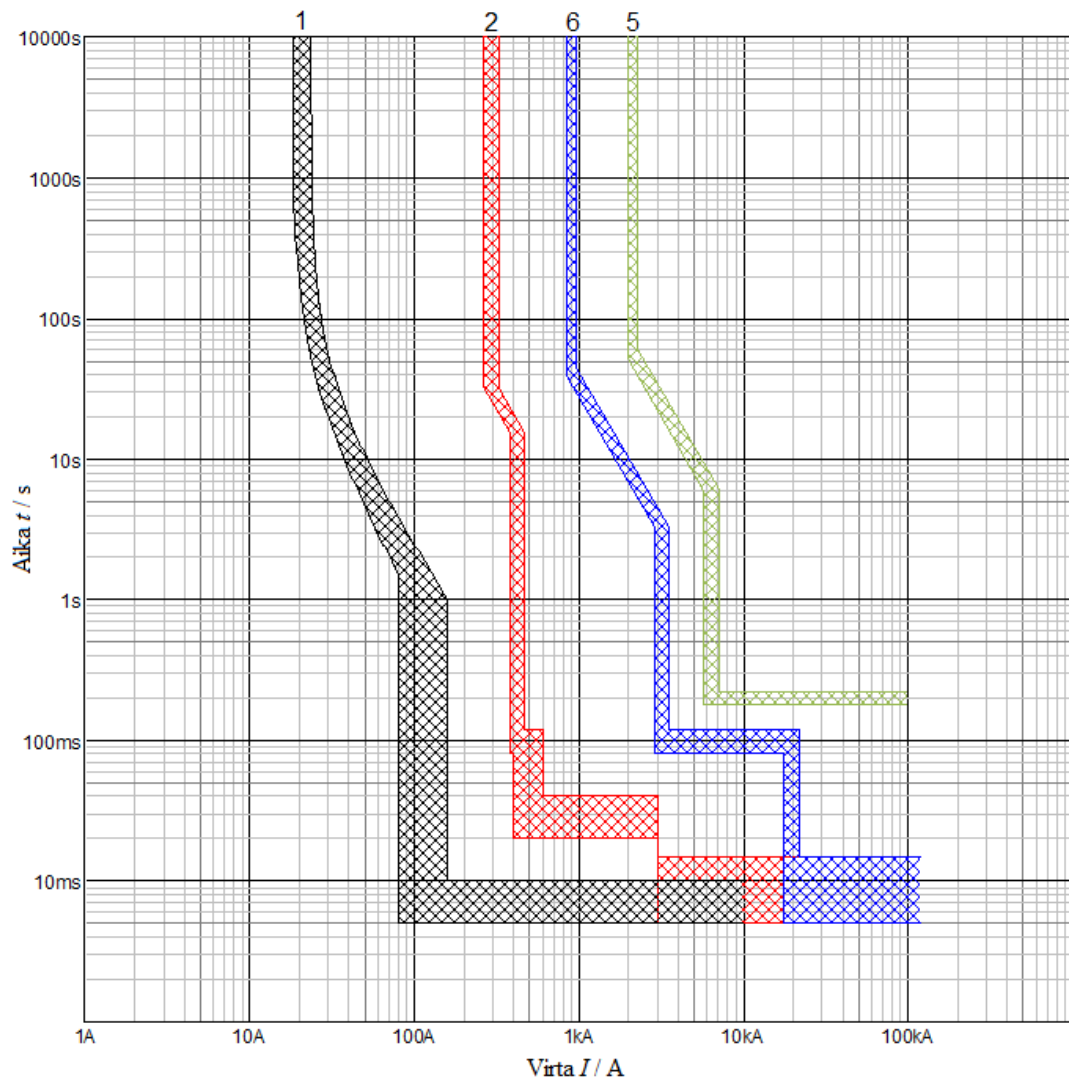
**Kuva 23.** UPS-katkaisijoiden selektiivisyyskäyrät normaalisyötöllä

Kuten kuvasta nähdään, joudutaan useamman peräkkäisen suojalaitteen kanssa selektiivisyyskäyrästä säättämään hyvin tarkasti, jotta saavutetaan suojauksen täysin selektiivinen toiminta. Kuvassa käyrä 1 esittää C16A johdonsuojakatkaisijaa, käyrä 2 esittää 250 A:n katkaisijaa, käyrät 3 ja 4 taas 400 A:n katkaisijoita ja käyrä 5 esittää 3200 A:n pääkeskuksen ilmakatkaisijaa. Ilmakatkaisijan oikosulkusuojauksen aika-arvona on tässä käytetty 0,2 sekuntia, jotta huomioidaan myös mahdollisen huoltosyötön käytön vaikutus suojauksen selektiivisyyteen. 400 A:n katkaisijoista ylempi (käyrä 4) hoitaa UPS-laitteiston suojauksen ja pystyttiin asettelemaan myös 0,2 sekuntiin, koska selektiivisyyskäyrä ei tällä arvolla kuitenkaan risteä pääkeskuksen katkaisijan vastaavan arvon kanssa.

UPS-laitteistoille ja jakelukiskoille saatiin aseteltua nimellisen mukaiset virrat käyttöön, suojauksen kuitenkin pysyessä selektiivisenä, kuten on nähtävissä kuvasta 22. Hetkellisen oikosulkusuojauksen selektiivisyyskäyrästä on nähtävissä, että täyttä selektiivisyyttä ei isommilla oikosulkuvirroilla saavuteta. Tämä ei kuitenkaan tässä tapauksessa vaikuta selektiivisyyteen, koska UPS-laitteistojen kautta saatavat oikosulkuvirrat jäävät jo edellä mainittuun 670 ampeeriin, jolloin oikosulkutilanteessakaan ei yllä epäselektiiviselle suojausalueelle. Myös C16A johdonsuojakatkaisijoiden yhteydessä esiintyvät oikosulkuvirrat jäävät pienemmiksi, kuin käyrästä risteämiskohdan mukainen 3 kA:n virta-arvo.

400 A:n katkaisijoiden oikosulkusuojauksien virta-arvot on aseteltu peräkkäin portaittain, alimmaisen katkaisijankin arvon ollessa suurempi kuin 670 A. Tarkoituksena on kuitenkin suojata välittömästi jakelukiskot, kun taas vian esiintyessä UPS-nousukeskuksen jakelukiskossa UPS-laitteistot menevät automaattisesti ohitukselle, jolloin myös oikosulkuvirrat ovat suuremmat ja riittävät täten takaamaan suojauksien nopean ja oikeanlaisen toiminnan myös 400 A:n katkaisijoiden osalta. Jos myös 400 A:n katkaisijat olisi aseteltu UPS-laitteiston tuottaman oikosulkuvirran mukaisesti, ei olisi ollut mahdollista saavuttaa täyttä selektiivisyyttä 250 A:n katkaisijoiden kanssa.

Ulkoisen ohitusyötön ollessa päällä, eivät 400 A:n katkaisijat osallistu UPS-nousukeskuksen suojaamiseen UPS-laitteistojen ollessa sammutettuina. Kun ulkoinen ohitusyöttö on kytkettynä päälle, kasvaa UPS-nousukeskuksen jakelukiskossa esiintyvät oikosulkuvirrat paljon suuremmiksi kuin mitä UPS-käytöllä esiintyvät oikosulkuvirrat ovat. Tämä ei kuitenkaan vaikuta 250 A:n katkaisijoiden asetteluihin, vaan katkaisijat vain toimivat aiempaa nopeammin hetkellisen oikosulkusuojauksen toimesta. 800 A:n peräkkäiset katkaisijat on aseteltu samoihin asetteluarvoihin, koska näiden keskinäisellä selektiivisyydellä ei laitteiston toiminnan kannalta ole merkitystä. Lisäksi näin saadaan maksimi nimellisvirran mukainen tehonjako, jolloin pystytään varmistamaan myös toisen UPS-nousukeskuksen varasyöttöyhteyden tehonsiirtokapasiteetin riittävyys. Selektiivisyyskäyrästä UPS-nousukeskuksen ohituskäytössä on esitetty kuvassa 24.



**Kuva 24.** UPS-katkaisijoiden selektiivisyyskäyrästöt ohitusyötöllä

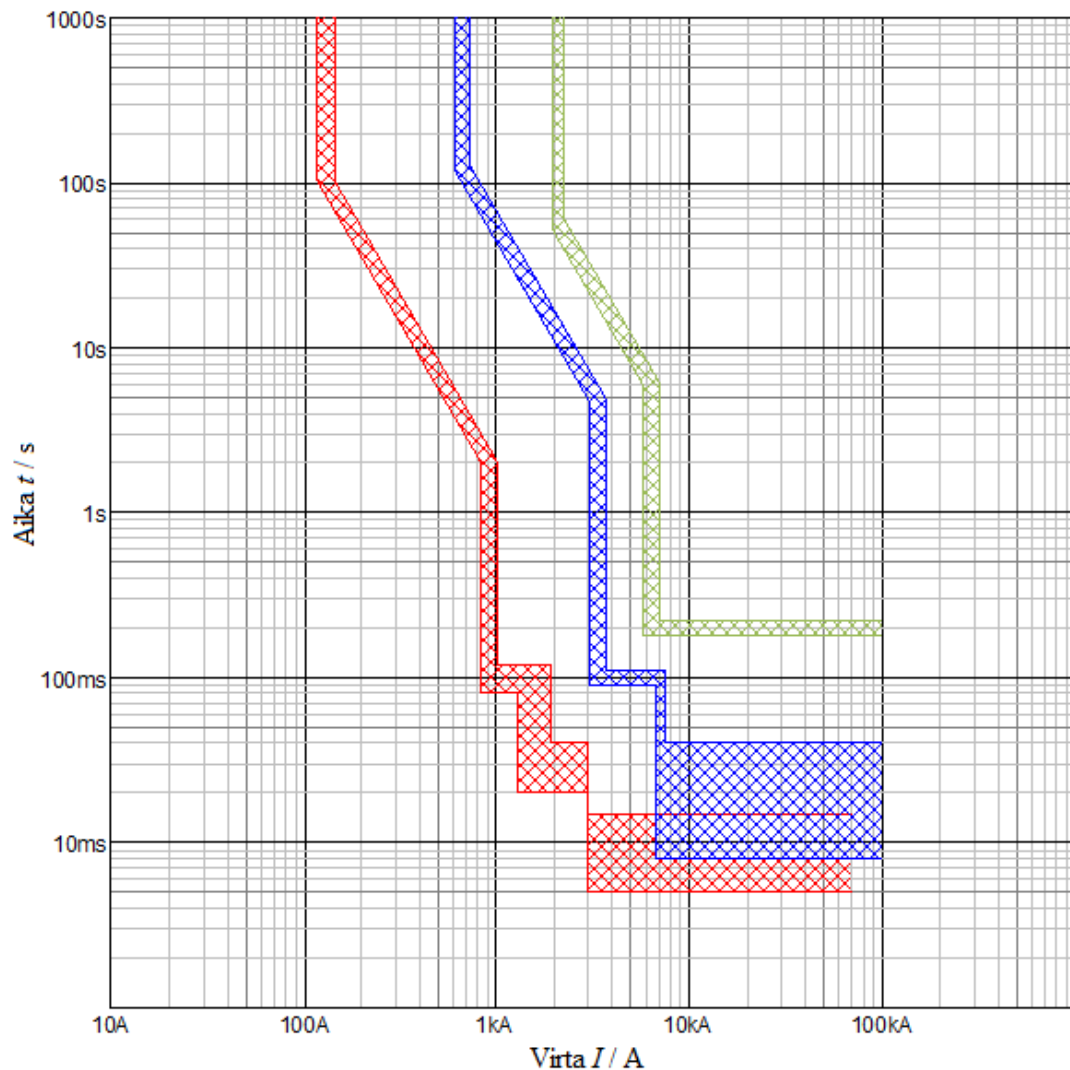
Kuten kuvasta nähdään, on ohituskäytöllä selektiivisyyskäyrien välillä huomattavasti enemmän säätövaraa. Arvot ovat kuitenkin samat kuin mitä UPS-käytölläkin, ainoastaan 800 A:n katkaisijat asetteluarvot on sovitettu 400 A:n katkaisijoiden vastaavien tilalle, jotta saavutetaan edelleen selektiivinen suojaus. Kuten kuvassa 23, tässäkin käyrä 1 kuvaa C16A johdonsuojakatkaisijaa, käyrä 2 kuvaa 250 A:n katkaisijaa, käyrä 5 kuvaa pääkeskuksen ilmakatkaisijaa ja käyrä 6 kuvaa 800 A:n ohitusyötön katkaisijoita.

Koska pääkeskuksen huoltosyötön katkaisijan oikosulkusuojauksen aika-asettelun 0,2 sekunnin arvo tulee samalle alueelle 800 A:n katkaisijan vastaavien asetteluarvojen kanssa, on ohitusyötön katkaisijoille oikosulkusuojauksen aika-arvoksi aseteltu 0,1 sekuntia. Tämä toimii edelleen selektiivisesti 250 A:n katkaisijan asetteluarvojen kanssa, ainoastaan hetkellisen suojauksen kohdalla selektiivisyyskäyrät vähän matkaa risteävät. Jakelukiskossa esiintyvät oikosulkuvirrat eivät kuitenkaan missään tilanteessa yllä yli 10,5 kA:n, joten suojaus toimii kaikissa tilanteissa täysin selektiivisesti. C16A johdonsuojakatkaisijoiden osalta tilanne on sama kuin UPS-käytölläkin, oikosulkuvirrat eivät yllä 250 A:n katkaisijan selektiivisyyskäyrästön risteämiskohdan arvojen kanssa samalle tasolle.

### 6.4.2 Jakelukiskojen selektiivisyys

Jakelukiskojen virranottimien ja pääkeskusten lähtökatkaisijoiden välisen selektiivisyyden varmistaminen ja määrittely oli mielenkiintoinen ja haastava osa projektia. Tähän vaikutti myös paljon virranottimen syöttämän verkonosan perässä olevien suojalaitteiden tyypit ja nimellisvirrat. Nämä olivat kuitenkin vapaammin valittavissa sopiviksi, kunhan oli saatu jakelukisko virranottimineen toimimaan suojauksen osalta selektiivisesti pääkeskuksen lähtö- ja pääkatkaisijoiden kanssa.

Pääkeskuksen lähtökatkaisijat aseteltiin oikosulkusuojauksen aika-arvojen osalta 0,1 sekuntiin, joka on selektiivinen myös huoltosyöttöjen ilmakatkaisijoissa olevan 0,2 sekunnin aika-arvon kanssa, kuten nähdään alla olevasta kuvasta 25. Muut arvot pystyttiin asettelemaan melko vapaasti, koska nämä jäivät lähtökatkaisijoilla sen verran kauas selektiivisyyskäyrästössä pääkeskuksen pääkatkaisijoiden vastaavista, että risteävyyksiä ei esiintynyt.

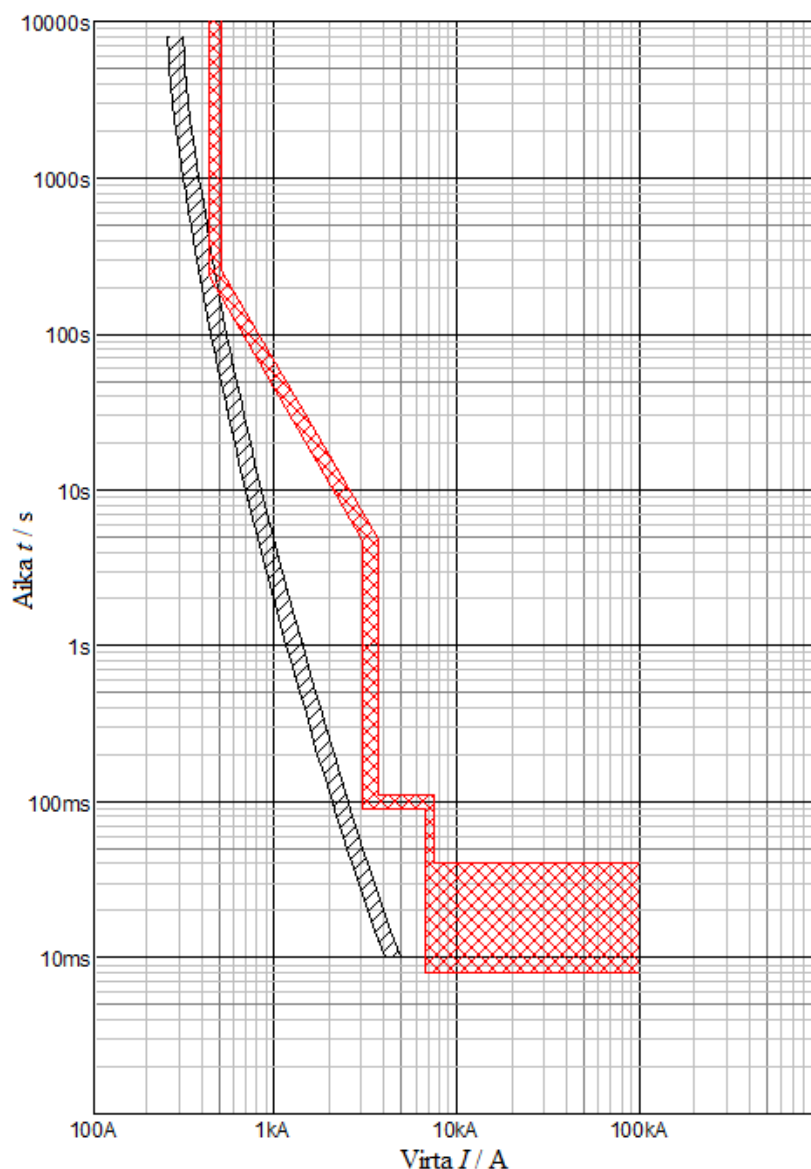


**Kuva 25.** Jakelukiskon asetteluarvot

Kuten kuvasta nähdään, sinisellä käyrällä esitetty pääkeskuksen 630 A:n lähtökatkaisija on täysin selektiivinen pääkeskuksen 3200 A:n pääkatkaisijan kanssa, joka on esitetty vihreällä käyrällä. Kumpikin edellä mainittu on ABB:n toimittamia suojalaitteita, mutta punaisella käyrällä esitetty jakelukiskon 160 A:n virranotin on Siemensin valmistama. Kuten kuvasta näkee, hetkellisen suojauksen alueella selektiivisyyskäyrät menevät päällekkäin lähtökatkaisijan kanssa. Tähän ei voi kuitenkaan täysin luottaa, koska ABB:n laskentaohjelmistosta ei löydy mallinnusta Siemensin vastaaville katkaisijoille. Tämän takia ABB:n ja Siemensin eri suojalaite yhdistelmistä tehtiin erilliset laboratoriotestit, joiden avulla määriteltiin keskenään toimivat suojalaitteyhdistelmät. Näitä tuloksia ei tässä työssä kuitenkaan julkaista kokonaisuudessaan liiketoiminnallisista syistä.

ABB:n 630 A:n katkaisija on testitulosten mukaan aina selektiivinen Siemensin 160 A:n katkaisijan kanssa, joten yhdistelmä on täysin selektiivinen. Vastaavasti yhdistelmä ABB 630 A katkaisija ja Siemens 250 A virranotin koestettiin ja tuloksena voitiin todeta, että T5L tyyppin ABB:n katkaisija ei ole missään olosuhteissa selektiivinen Siemensin 250 A:n virranottimen kanssa. Osittainen selektiivisyys saavutetaan, kun käytetään T6L tyyppin ABB:n 630 A:n katkaisijaa yhdessä Siemensin 250 A:n virranottimen kanssa. Nämä kaksi ovat keskenään selektiivisiä 25 kA:n oikosulkuvirtaan asti, jonka jälkeen ei voida enää varmuudella kertoa kumpi suojalaitteista toimii ensin. Tästä syystä kyseistä yhdistelmää voitiin käyttää vain jakelukiskoissa, joissa maksimi oikosulkuvirrat olivat 25 kA. Muissa tapauksissa käytettiin 200 A:n gG-sulakkeella varustettuja virranottimia, jotka ovat täysin selektiivisiä ABB:n 630 A:n katkaisijan kanssa.

Projektin edetessä yhden suurimmista yllätyksistä aiheutti ABB:n laskentaohjelmiston ja itse katkaisijoiden aseteltavissa olevien asetteluarvojen eroavuus. Kun lähtökatkaisijana oli ABB:n 630 A:n katkaisija, joka syöttää 400 A:n jakelukiskoja, jouduttiin katkaisijan ylikuormitussuojauksen aika-asettelu määrittämään 18 sekunnin aika-arvoon, jotta katkaisija saatiin ylikuormitussuojauksen osalta toimimaan selektiivisesti Siemensin 200 A:n gG-sulakkeella varustetun virranottimen kanssa. Tämä siitä syystä, että selektiivisyyskäyrä laskee huomattavasti alaspäin, kun ylikuormitussuojauksen virta-arvoksi asetellaan jakelukiskon nimellisvirran mukainen 400 A. Näin tehtynä näiden suojalaitteiden yhdistelmä toimi selektiivisyyskäyrästön mukaan täysin selektiivisesti. Keskusvalmistuksen yhteydessä tehdyissä asetteluissa huomattiin kuitenkin, että kyseisen tyyppistä ABB:n 630 A:n katkaisijaa ei ylikuormitussuojauksen aika-arvon osalta ollut mahdollista asetella kuin maksimissaan 10 sekuntiin. Tällöin edellä mainittu suojalaitteyhdistelmä ei olekaan enää täysin selektiivinen, kuten nähdään kuvasta 26.



**Kuva 26.** ABB 630 A katkaisija ja Siemens 200 A gG virranotin

Päällekkäisyys ei ole hirveän suuri ja osuu alueelle, jossa ei olla enää edes lievän ylikuormituksen puolella, mutta ei kuitenkaan vielä oikosulkuvirtojen mukaisella alueellakaan. Tätä ei voisi kuitenkaan selektiivisyyskäyrästä perusteella sanoa täysin selektiivisesti toimivaksi suojaukseksi. Tässä yhteydessä on kuitenkin otettava myös huomioon, että 200 A:n gG-sulakkeella varustettu virranotin on Siemensin valmistama, jolloin täyttä varmuutta yhteensopivuudesta ABB:n laskentaohjelmistolla mallinnettuna ei saavuteta tulosten osalta. Tästä syystä myös tämä suojalaiteyhdistelmä koestettiin laboratoriotestien yhteydessä, joista saatujen tulosten perusteella edellä mainituilla suojalaitevalinnoilla saavutetaan täysin selektiivisesti toimiva suojaus.

Lähtökohtaisesti jakelukiskoissa olevien virranottimien syöttämät nousukaapelit pyrittiin valitsemaan niin, että katkaisijoiden ylikuormitussuojaus voitiin asettaa suoraan syötetävän keskuksen tai laitteen nimellisvirran mukaisesti. Joissakin tapauksissa kuitenkin

kaapeli on kuitenkin syöttömatkan takia virran kestoaltaan keskuksen/laitteen nimellisvirtaa suurempi, mutta kuitenkin pienempi kuin mitä katkaisijan ylikuormitussuojauksen virta-asettelut antavat rajojen puolesta asettaa. Tällöin tulee ottaa huomioon asetteluissa, että virta-arvo määritetään ensisijaisesti keskuksen/laitteen nimellisvirran mukaisesti tai jos kyseessä on nimellisvirraltaan syötettävien kohteiden nimellisvirtoja suurempi jakelukisko, tulee virta-asettelu ehdottomasti tehdä jakelukiskoa syöttävän nousukaapelin virrankeston mukaan.

Mitä enemmän peräkkäisiä suojalaitteita on samassa suojausketjussa ja mitä lähempänä näiden virta-arvot ovat toisiaan, sitä todennäköisemmin joudutaan tilanteeseen, jossa täytyy tehdä kompromisseja suojauksen selektiivisyyden suhteen. Varsinkin jos mukana on johdonsuojakatkaisijoita tai kytkinvarokkeita, joiden osalta ei ole säädettävissä asettelu-arvoja, ei pystytä suojauksien aika-arvoja säätämälläkään sovittamaan eri yhdistelmien toimintaa selektiiviseksi. Lisäksi tulee ottaa huomioon edelläkin mainittujen tilanteiden kaltaisten eri valmistajien toimittamien suojalaiteyhdistelmien rajoitukset ja tarvittaessa toteuttaa näille erilliset testit, jotta varmistutaan täysin selektiivisesti toimivan suojauksen saavuttamisesta. Mikäli täysin selektiivisesti toimivaa suojausta ei pystytä toteuttamaan, tulee varmistaa, että ainakin ylikuormitus- ja oikosulkusuojaus joka tapauksessa toteutuvat ja selektiivisyyden osalta viimeistään suojausketjun viimeisin suojalaite erottaa koko suojausketjun kerralla verkosta, ilman että siitä aiheutuu muualle sähköjakeluverkkoon häiriöitä.

## 7. KOESTUKSET JA KÄYTÖNSEURANTA

Sähkönjakelujärjestelmän suojauksen selektiivisyyden saavuttamisen ja varmistamisen kannalta yksi tärkeimmistä vaiheista on koestukset ja jakelujärjestelmän käyttöönoton jälkeinen käytönseuranta. Näiden tarkoituksena on varmistaa, että sähkönjakelujärjestelmä täyttää käyttöönotettaessa suunnittelussa asetetut vaatimukset ja toimii oikeanlaisella tavalla sekä pysyy vaatimusten mukaisessa kunnossa koko käyttöikänsä ajan.

Koestuksien tekeminen ja muutenkin sähkönjakelujärjestelmän toimintakyvyn tarkistaminen ja ylläpitäminen on erikseen vaadittu sähköturvallisuuslain 1135/2016 mukaan tehtäväksi. Sähköturvallisuuslain [15] mukaan: ”*Sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin sekä niitä on huollettava ja käytettävä käyttötarkoituksensa mukaisesti niin, että:*

- 1) niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa;*
- 2) niistä ei sähköisesti tai sähkömagneettisesti aiheudu kohtuutonta häiriötä;*
- 3) niiden toiminta ei häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti.”*

Koska sähköturvallisuuslain mukaan työn kohteena olleen projektin sähkölaitteisto kuuluu luokkaan 2, tulee normaalin käyttöönottotarkastuksen lisäksi suorittaa myös varmennustarkastus. Tämän tarkastuksen tarkoituksena on riittävässä laajuudessa tarpeellisin toimenpitein varmistaa, että sähkölaitteisto täyttää sähköturvallisuudelle ja sähkömagneettiselle yhteensopivuudelle säädetyt vaatimukset. Jos tarkistettavassa kohteessa on lääkin-  
tätiloja, räjähdysvaarallisia tiloja tai palovaarallisia tiloja, tulee myös nämä sisällyttää varmennustarkastukseen. [15]

Luokan 2 sähkölaitteistolle tulee myös laatia sähköturvallisuutta ylläpitävä kunnossapito-ohjelma, jolla varmistetaan laitteiston pysyvän huollettuna ja toimintakunnossa koko elinkaarensa ajan. Näiden lisäksi vaaditaan erillisten määräaikaistarkastuksien suorittamista sähkölaitteistolle kymmenen vuoden välein. Näiden tarkastusten tarkoituksena on riittävässä laajuudessa tarpeellisin toimenpitein varmistaa, että sähkölaitteiston käyttö on edelleen turvallista. Lisäksi varmistetaan, että sähkölaitteistolle tehtyä kunnossapito-ohjelmaa on noudatettu ja se on edelleen riittävä laitteiston turvallisuuden ylläpitämiseksi jatkosakin. [15]

### 7.1 Koestukset laitteiston valmistuttua

Kun laitteisto on suunniteltu ja se on valmistettu, tekee laitevalmistaja ensimmäiset koestukset toimittamalleen laitteistolle jo tehtaalla. Tällä varmistetaan laitteiston täyttä-



vän suunnittelussa määritellyt vaatimukset sekä yleiset standardien asettamat vaatimukset. Laitetoimittajan tekemät koestukset kertovat kuitenkin vain kyseisen laitteiston toimivuuden eikä varmista täten kaikkien laitteistojen keskinäistä toimivuutta ja suojauksen selektiivisyyden saavuttamista. Tästä syystä koko sähköjakelujärjestelmän suojauksien yhteistoiminnan koestus tulee tehdä vielä erikseen työmaalla koko sähkölaitteiston ollessa valmiina käyttöön otettavaksi. Silloin voidaan todeta käytännössä, toimiiko suojausjärjestelmä suunnitellusti ja määritellyt asetteluarvot oikein. Tällöin pystytään koestustulosten perusteella tekemään vielä hienosäätöjä asetteluarvoihin, mikäli tällaiselle tarvetta ilmenee.

Koestuksessa testataan, että laitteisto suojauksineen toimii suunnitellun mukaisesti. Viimeistään tässä vaiheessa on tarkoituksena löytää mahdollisesti suunnittelussa tai asennuksissa tapahtuneet virheet ja laitteiston komponenteissa mahdollisesti esiintyvät laitevauriot. Myös virheellisten lähtötietojen ja teknisten tietojen esiintyminen paljastuu yleensä tässä vaiheessa. Sen mukaan huomataanko mahdolliset virheet jo valmistajan tekemissä koestuksissa tai vasta työmaalla laitteiston ollessa jo asennettuna, joudutaan tarvittaessa turvautumaan hyvin erilaisiin korjaustoimenpiteisiin. Valmistajan huomattessa mahdolliset virheet tai puutteet, nämä voidaan yleensä melko vaivattomasti korjata saman tien tarvittavin laitteistomuutoksien ja/tai päivityksien tehtaalla. Jos taas virheet tai puutteet huomataan vasta laitteistojen ollessa jo asennettuna työmaalla, tulee korjaustoimista monesti huomattavasti hankalampia ja kustannuksiltaan suurempia.

Työn kohteena olleen projektin suojalaitteiden parametrien konfigurointeja tehtäessä ilmeni, että suunnittelua tehtäessä on saatu virheellisiä lähtötietoja. Pääkeskuksissa olevien lähtökatkaisijoiden asetteluarvoille oli saatu tietyt rajaehdot laitetoimittajan manuaalien ja laskentaohjelmistojen perusteella. Näiden perusteella oli valittu komponentit ja määritetty asetteluarvot niin, että saavutetaan suojauksen selektiivinen toiminta. Kun laitteisto oli valmistettu ja oltiin konfiguroimassa suojalaitteiden asetteluarvoja, huomattiin näille ilmoitettujen rajaehdojen olleen virheellisiä. Koska asetteluarvoja ei voitu toteuttaa suunnitelmien mukaan, tuli varmistaa riittävien toimenpitein suojauksen toimivuus edelleen uusilla asetteluarvoilla ja tarvittaessa määrittää korvaavat komponentit, jotta päästiin edelleen alkuperäisten suunnitelmien mukaiseen lopputulokseen.

## 7.2 Käytönseuranta jatkossa

Käytönseuranta on hyvin olennainen osa sähkölaitteiston kunnon huolehtimisesta ja tällä pystytään merkittävästi vaikuttamaan myös suojauksen selektiivisyyden säilymiseen. Käytönseurannan tarkoituksena on seurata esimerkiksi katkaisijoiden toimintakertojen lukumäärää, jakelukiskojen siirtämien huipputehojen arvoja, vikojen ilmaantumipaikkoja jakeluverkossa ja niiden lukumäärää sekä suojauksille määritettyjen asetteluarvojen riittävyyttä normaaleissa ja poikkeavissa käyttötilanteissa.

Kustakin jakeluverkonosasta riippuen suojalaitteiden toimintakertojen lukumäärät saattavat olla hyvin vähäisiä. Tämän työn kohteena olleessa projektissa katkaisijat liittyivät pääsääntöisesti sähkön pääjakeluun, lähinnä yksittäiset isommat katkaisijat ja virranottimet syöttävät erillisiä keskuksia. Tästä johtuen katkaisijoiden toimintakerrat jäävät lukumäärältään hyvin pieniksi vuositason, jonka johdosta myös niiden vikaantumisen havaitseminen toiminnassa tapahtuvien häiriöiden kautta on hankalaa. Nykyiset suojalaitteet ovat yleensä varustettu kattavilla itsevalvontaominaisuuksilla, jolloin ilmiselvät viat tulevat kenttäväylän kautta käytönvalvontajärjestelmän tietoon. Tiedetyt viat eivät kuitenkaan ilmene välttämättä ennen kuin katkaisijan toimintaa vaadittaessa. Tästä syystä suojalaitteita tulisikin testata tasaisin väliajoin aina kun mahdollista, joskin se on työn kohteena olleessa projektissa hyvin haastavaa laitoksen toimialasta johtuen ja vaatiikin erillisten koestuskierrosten hyvää ennalta suunnittelua ja määrittystä kunnossapito-ohjelmaan. [3]

Suojalaitteiden elinkaaren määrittäminen on, heti hyvin suunnitellun suojauksen toiminnan jälkeen, tärkein asia suojauksen selektiivisyyden varmistamisessa myös jatkossa. Mikäli suojalaitteet vanhenevat tai vioittuvat, johtaa aikanaan usean samanaikaisen vikaantumisen esiintyminen suuriin ongelmiin jakelujärjestelmän suojauksissa ja edelleen projektin laitoksen toiminnan turvaamisessa. Pääkeskuksissa käytetyissä katkaisijoissa on valmistajan toimesta määritelty tiedetyt toimintakertojen määrät, jonka jälkeen katkaisijat tulisi korvata uusilla. Jotta näihin ilmoitettuihin käyttökertojen lukumääriin päästään, tulee suojalaitteet huoltaa valmistajan ohjeistamien menetelmien ja aikavälien mukaisesti.

Määritelty toimintakertojen lukumäärät riippuvat kunkin katkaisijan nimellisvirrasta ja runkokoosta sekä niiden kuormitusasteesta. Pääkeskuksissa käytetyt pääkatkaisijat ovat ABB:n Emax2 -malleja, joille luvataan keskuksissa käytetyn mallin osalta mekaaniseksi käyttöiäksi 20 000 toimintakertaa ja sähköiseksi käyttöiäksi 7 000 toimintakertaa. Vastaavasti sähkönjakelukiskojen ja erillisten laitteiden syöttöön käytetyille ABB:n kompaktikatkaisijoille on ilmoitettu omat arvonsa, Tmax T5 ja T6 mallisarjan katkaisijoille on luvattu samat arvot, mekaaniseksi käyttöiäksi 20 000 toimintakertaa ja sähköiseksi käyttöiäksi 7 000 toimintakertaa. [6; 7]

Pääkeskuksissa käytetyille pienimmille ABB:n XT-mallin katkaisijoille luvataan mekaaniseksi käyttöiäksi 25 000 toimintakertaa ja sähköiseksi käyttöiäksi 8000 toimintakertaa. Jakelukiskoissa käytetyille Siemensin 3VA-mallisarjaa oleville virranottimille puolestaan luvataan mekaaniseksi käyttöiäksi 20 000 toimintakertaa ja sähköiseksi käyttöiäksi 10 000 - 12 000 käyttökertaa. ABB:n ja Siemensin 250 A:n katkaisijoissa siis näyttäisi olevan hieman eroa mekaanisen ja sähköisen käyttöiän suhteen toisiinsa verrattuna. Seuraamalla kunkin suojalaitteen toimintakertojen lukumäärää säännöllisesti esimerkiksi vuositason, voidaan määrittää kullekin suojalaitteelle tuleva vaihtoajankohta kenttäväylän kautta saatavien käyttötietojen perusteella. Tässä yhteydessä tulee muistaa, että jakelukiskoissa käytetyissä Siemensin virranottimissa ei ole käyttötietoja välittävää kent-

täväylää liitettyä, joten näiden tuleva käyttöikä tulee arvioida muilla tarpeellisilla toimenpiteillä. Lisäksi näiden suojalaitteiden vikaantuminen ei aiheuta häiriöitä muualle verkkoon, vaan ainoastaan kunkin syöttämän keskuksen/laitteen toimintaan. Tästä syystä näiden ennakoimattomalla ikääntymisellä ei ole niin suurta vaikutusta yleisen sähköjakelujärjestelmän toiminnan kannalta. [8; 20]

Projektin kohteena olleen kriittisen laitoksen kaltaisissa käyttökohteissa katkaisijoiden ei kuulu toimia kuin hyvin harvoin, mikäli suojausjärjestelmä on kunnossa ja sähköjakelujärjestelmä toimii normaalisti. Mahdollisia toimintakertoja pitäisi olla vuodessa maksimissaan muutama kappale, mukaan lukien suoritettavat suojausjärjestelmän koestukset. Muussa tapauksessa sähköjakelujärjestelmässä on toistuvia vikoja tai suojausjärjestelmän suunnittelussa ja toteutuksessa ei ole onnistuttu riittävän hyvin. Tällöin tulee selvittää, pystytäänkö tilanteeseen vaikuttamaan suojalaitteiden asetteluarvoja muuttamalla tai joudutaanko mahdollisesti muuttamaan sähköjakelujärjestelmän rakennetta ja siihen kuuluvia komponentteja.

Määritetyn vaihtoajankohdan mukaan on syytä tehdä laadittavaan kunnossapito-ohjelmaan erilliset maininnat tarpeellisten suojalaitteiden uusimiseksi riittävän ajoissa. Yleisesti ottaen pienimmät katkaisijat korvataan suoraan uudella vastaavalla, kun taas suurimpia katkaisijoita pystytään huoltamaan myös vaihto-osilla ja näin jatkamaan näiden käyttöikää. Lisäksi tulee muistaa, että vaikka toimintakertojen puolesta katkaisijan määritetty käyttöikä olisikin esimerkiksi 50 vuotta, ei numeeristen suojareleiden yhteydessä voida jättää huomioimatta elektroniikan vanhenemista. Tämän huomioon ottaminen on hieman haastavampaa, koska ajallisen vanhenemisen vaikutuksesta suojalaitteen käyttöikään ei ole valmistajien toimesta otettu kantaa. Tässä onkin hyvä hyödyntää ajansaatossa kertyviä käytönseurannan tietoja, joiden avulla pystytään hahmottamaan paremmin suojalaitteiden käyttöikää erilaisissa käyttöympäristöissä vaihtelevilla kuormitusasteilla. [6; 8]

Käytönseurannasta saatavien tietojen avulla pystytään myös tarkastelemaan suojalaitteille määritettyjen asetteluarvojen riittävyyttä. Lähtökohtaisesti nämä ovat tämän projektin yhteydessä määritelty aina kaapeleiden ja kiskostojen nimellisvirtojen mukaan, joten tehoa on sen verran käytössä mitä laitteistot pystyvät tarjoamaan. Jakeluverkossa siirtyviä tehoja tarkkailemalla on kuitenkin mahdollista varautua jo ennalta mahdollisiin ylikuormitustilanteisiin, jolloin tietyissä käyttötilanteissa voidaan säätää asetteluarvoja ja verkon topologiaa tarpeen mukaan jo ennalta häiriöiden välttämiseksi. Lisäksi huoltotoimenpiteitä pystytään tällöin kohdistamaan paremmin raskaasti kuormitettuihin verkonosiin.

## 8. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli suunnitella erään kriittisen laitoksen sähköjakelujärjestelmään selektiivisesti toimiva suojaus ja samalla kehittää suunnitteluprosessia myös tulevaisuuden projekteja varten. Nykyisin sähköjakeluverkkojen yhä enemmän laajentuessa ja samalla monimutkaistuessa, korostuu selektiivisesti toimivan suojauksen merkitys entisestään. Tulevaisuudessa sähköntuotannon hajautuessa ja täten erilaisten mikroverkkojen määrän lisääntyessä, tulee suojauksien selektiivisyyden toimia hyvin monissa erilaisissa käyttötilanteissa. Tämä vaatii huolellista sähköjakeluverkon mallinnusta ja erilaisten käyttötilanteiden vaihtumisesta aiheutuvien ilmiöiden huomioimista.

Isoissa kohteissa, kuten työn kohteenakin ollut projekti, sähköjakelujärjestelmät ovat laajuudeltaan suuria ja tehoa saatetaan syöttää järjestelmään useastakin eri liittymästä. Tämä aiheuttaa sen, että verkossa esiintyvät oikosulkuvirtojen arvot ja kulkusuunnat saattavat poiketa huomattavastikin toisistaan kulloisenkin käyttötilanteen mukaisesti. Selektiivisesti toimivan suojauksen osalta tämä vaatii hyvin joustavasti toimivia ratkaisuja, jotta suojausjärjestelmä pystyy mukautumaan erilaisten käyttötilanteiden luomiin haasteisiin. Jotta suojausjärjestelmästä saadaan toimiva kokonaisuus, tulee suunnittelijan kyetä käyttämään hyvin monenlaisia laskenta- ja mallinnustyökaluja. Lisäksi tulee kyetä ottamaan huomioon tulevaisuudessa tapahtuva jakeluverkon ja sen komponenttien ikäntyminen ja mahdollisten muutostarpeiden esiintyminen.

Tämän työn kohteena olleen projektin laaja sähköjakeluverkko koostui pääosin kahden eri laitevalmistajan komponenteista, joka loi tiettyjä haasteita selektiivisesti toimivan suojausjärjestelmän suunnittelussa. Jotta eri laitevalmistajien suojalaitteiden keskinäinen selektiivisyys saatiin varmistettua, tuli hyödyntää kummankin valmistajan omia laskentaohjelmistoja ja selektiivisyystaulukoita, jotta pystyttiin määrittelemään oikeanlaiset suojalaitteet ja näiden mahdolliset asetteluarvot. Tietyille suojalaitteyhdistelmille teetettiin erilliset laboratoriotestit, joiden avulla saatiin selville selektiivisesti toimivat suojalaitteyhdistelmät ja selektiivistä toimintaa mahdollisesti rajoittavat oikosulkuvirtojen raja-arvot. Testeistä saadut tulokset olivat hyvin mielenkiintoisia, mutta niitä ei valitettavasti voida tässä työssä esittää liiketoiminnallisista syistä.

Oikosulkuvirratt olivat projektin alussa suuritöisin osuus, koko sähköjakelujärjestelmä mallinnettiin ja tehdyn mallinnuksen perusteella pystyttiin laskemaan oikosulkuvirratt järjestelmän eri osissa. Oikosulkuvirtojen arvot vaikuttavat suoraan valittavien suojalaitteiden tyyppiin ja kokoon ja edelleen sitä kautta suojausjärjestelmän selektiivisyyteen. Eri-laisia laskentatuloksia erinäisissä käyttötilanteissa tuli erittäin suuri määrä, jonka takia tässä työssä tarpeelliset tulokset päädyttiin esittämään aina tarkasteltavan kohdan yhteydessä. Projektin aikana esiintyi erinäisiä muutoksia, jotka lisäsivät entisestään laskentaan ja mallinnukseen kuluvaa aikaa ja tarvetta palata suunnittelussa takaisinpäin, jotta voitiin

edelleen varmistaa suojauksen selektiivisyys muuttuneilla suojalaitteilla. Yleensä nämä muutokset aiheutuivat joko muun sähkönjakelujärjestelmän rakenteen ja komponenttien muutoksista, kustannuksellisista syistä tai laitevalmistajien tarjoamien lähtötietojen virheellisyydestä tai puutteista johtuen.

Oikosulkulaskelmien ohella suurimman osan työstä teetti erilaisten suojalaitteiden asetteluarvojen määrittäminen ja testaaminen. Tiettyjä perusoletuksia voidaan näiden yhteydessä käyttää, mutta lopulta asettelut tulee tehdä aina tapauskohtaisesti esiintyvien oikosulkuvirtojen ja kuormituksen keston perusteella sekä ottaen huomioon mahdolliset poikkeustilanteiden luomat muutokset. Joidenkin suojalaitteiden yhteydessä jouduttiin käyttämään lukituksia johtuen sähköasemilla olevista hyvin tiukoista asetteluarvoista, jotka vaikuttivat edelleen muualle sähkönjakeluverkon suojalaitteisiin tehtäviin asetteluihin. Suojalaitteet asetteluineen tuli määritellä niin, että mahdollinen vikapaikka jää aina mahdollisimman pieneksi ja sähkönjakelu pystyttäisiin turvaamaan kaikissa tilanteissa.

Suurin osa suojalaitteiden asetteluarvoista pystyttiin asettelemaan suoraan valmistajien omien ohjelmistojen avulla. Sulakkeiden ja katkaisijoiden yhdistelmät tarkistettiin toimiviksi valmistajien tarjoamien selektiivisyydestaulukoiden ja laskentaohjelmien mallinnuksen avulla. Työn kohteena olleessa laitoksessa oikosulkuvirrat olivat sen verran isot, että minioikosulkuvirrat eivät määritelleet asetteluita kuin ainoastaan joidenkin UPS-laitteistojen ja varavoimasyöttöjen kohdalla. Tästä syystä oikosulkusuojauksen virta-arvoilla pystyttiin luomaan jonkin verran pelivaraa säätöihin, aika-arvojen säätömahdollisuuksien ollessa sähköasemien asetteluista johtuen erittäin rajalliset. Diplomityön tekohetkellä ei vielä pystytty lopullisia käyttöönottokestuksia suorittamaan ja siten varmistamaan käytännössä suojausjärjestelmän ja asetteluarvojen toimivuutta. Nämä tullaan kuitenkin suorittamaan tulevaisuudessa, kun koko sähkönjakelujärjestelmä on rakennettu valmiiksi.

Suojalaitteet, varsinkin pääjakelureittien osalta, on varusteltu kattavasti käytönseurannan ja erilaiset hälytykset mahdollistavilla ominaisuuksilla. Tämä auttaa tulevaisuudessa suojausjärjestelmän toiminnan seuraamisessa ja vikojen syiden selvittämisessä sekä vaikutusten analysoinnissa. Näiden avulla pystytään koostamaan kunnossapitosuunnitelmaan tarvittavat toimenpiteet ja seuraamaan näiden riittävyyttä laitteiston eliniän aikana. Lisäksi pystytään seuraamaan eri verkonosien kuormituksia ja säätämään tarpeen tullen asetteluarvoja saatujen tietojen perusteella.

Työtä tehdessä erilaista materiaalia ja tuloksia kertyi suuri määrä, jota pystytään edelleen hyödyntämään tulevaisuuden projekteissa. Tähän työhön on koottu tärkein materiaali ja oleelliset tulokset, jotka voitiin julkisesti julkaista. Työ opetti kokonaisuudessaan sähkönjakelujärjestelmien suojauksesta paljon ja jätti hyvän pohjan laajentaa tietämystä entisestään. Varsinkin suojalaitteiden välisten lukituksien konfiguroiminen ja määrittely vaatii erityistä perehtymistä ja osaamista, jotta järjestelmä saadaan toimimaan hyvin yhtenä kokonaisuutena. Tulevaisuudessa suojalaitteiden ja uusien tekniikoiden kehitys mahdollistaa entistä monimutkaisempien sähkönjakeluverkkojen selektiivisen suojauksen.

## LÄHTEET

- [1] ABB e-Design, DOC - User Manual. PDF. Saatavilla: <http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106103A9880&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [2] ABB, Kahvasulakkeet, 2...1600 A gG ja aM -tyypit. 2009. PDF. Saatavilla: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SCC317002C1801&LanguageCode=fi&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [3] ABB, SACE Emax 2, Low voltage air circuit-breakers Emax E1.2-E2.2-E4.2-E6.2, Manual. PDF. Saatavilla: <http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SDH001316R0002&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [4] ABB, Substation automation solution with IEC 61850. Singapore 2010. PDF. Saatavilla (viitattu 18.8.20118): [http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/9276485464e7953cc125770300133d9a/\\$file/ABB+Substation+Automation+Solution.pdf](http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/9276485464e7953cc125770300133d9a/$file/ABB+Substation+Automation+Solution.pdf)
- [5] ABB, Technical Application Papers, Low voltage selectivity with ABB circuit-breakers. 2018. PDF. Saatavilla: <https://library.e.abb.com/public/65ddf36f7c3bd0fec1257ac500377a37/1SDC007100G0204.pdf>
- [6] ABB, Technical catalogue, SACE Emax2, Low voltage air circuit breakers. 2018. PDF. Saatavilla: <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SDC200023D0208&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [7] ABB, Technical catalogue, SACE Tmax. T Generation, Low voltage moulded-case circuit-breakers. 2016. PDF. Saatavilla: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SDC210015D0208&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [8] ABB, Technical catalogue, SACE Tmax XT, New low voltage moulded-case circuit-breakers. 2017. PDF. Saatavilla: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SDC210033D0204&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [9] ABB, TTT-käsikirja, Luku 7: Oikosulkusuojaus, 2000-07.

- [10] D1-2012, Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. 20. painos. Helsinki 2013. Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry.
- [11] Hakala-Ranta, A & Rintamäki, O & Starck, J. Utilizing possibilities of IEC 61850 and GOOSE. ABB 2009. Saatavilla: [https://library.e.abb.com/public/3ff2dbceff3a10556c12575e60043b35f/ABB\\_whitepaper\\_CI-RED\\_2009\\_0741.pdf](https://library.e.abb.com/public/3ff2dbceff3a10556c12575e60043b35f/ABB_whitepaper_CI-RED_2009_0741.pdf)
- [12] Hietalahti, L. (2013). Teollisuuden sähkökäytöt. 1. painos. Tampere: Tammertekniikka. 246 s.
- [13] IEC 60909-0:2016, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents, International Electrotechnical Commission (IEC), Genève 2016.
- [14] Lakervi, E. & Partanen, J. (2008). Sähkönjakelutekniikka. 3. painos. Helsinki: Otatieto. 295 s.
- [15] Sähköturvallisuuslaki 1135/2016. Finlex. Helsinki 2016. Saatavilla (viitattu 28.10): <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161135>
- [16] SFS 6000-4-43:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-43: Suojausmenetelmät. Ylivirtasuojaus. 4. painos. Helsinki 2017. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.
- [17] SFS 6000-5-53:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 5-53: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Erottaminen, kytkentä ja ohjaus. 4. painos. Helsinki 2017. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.
- [18] SFS 6000-7-710:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 7-710: Erikoistilojen ja -asennusten vaatimukset. Lääkintätilat. 4. painos. Helsinki 2017. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.
- [19] Siemens, Low Voltage Protection Devices, Selectivity-Tables. 2018. PDF. Saatavilla: [https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109748621/Selectivity-Tables\\_05\\_2018\\_en\\_201804261304565014.pdf?download=true](https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109748621/Selectivity-Tables_05_2018_en_201804261304565014.pdf?download=true)
- [20] Siemens, Low-Voltage Power Distribution and Electrical Installation Technology. 2018. PDF. Saatavilla: [https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109482234/LV10\\_042018\\_EN\\_Web\\_201808090828269746.pdf?download=true](https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109482234/LV10_042018_EN_Web_201808090828269746.pdf?download=true)
- [21] SIEMENS, SIRPOTEC 5 Overcurrent Protection 7SJ82/7SJ85 Manual, PDF. Saatavilla: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109742384/siprotec-5-7sj82-7sj85-overcurrent-protection-manual?dti=0&lc=en-FI>

- [22] Teollisuuden suurjänniteverkkojen relesuojaus 16.-17.1.2018. Kiwa Inspecta. Vantaa 2018. 240 s.